

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

К.Я.Кондратьев
Н.Н.Крупенио
А.С.Селиванов

Планета
Венера

Рецензент: канд. физ.-мат. наук Л. К. Ефимова (Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова)

На основе использования данных наблюдений запущенных в последние годы АМС «Венера», «Вега» и «Пионер—Венера» и результатов теоретических исследований дан анализ современных представлений об атмосфере и поверхности Венеры, а также о происходящих на этой планете процессах. Главное внимание уделено сравнительно-планетологическим аспектам изучения Венеры. В связи с этим основное место в книге занимают результаты исследования венерианской атмосферы — ее химического состава, теплового режима и динамики (общей циркуляции атмосферы). Детально проанализированы свойства и закономерности облачного покрова Венеры, рассмотрены закономерности климата и эволюции планеты.

Книга может представлять интерес для широкого круга читателей, проявляющих интерес как к планетологии, так и к геофизическим наукам.

In the book "Planet Venus" by K. Ya. Kondratyev, N. N. Krupeniy, A. S. Selivanov based on the recent observational data of satellites "Venera", "Vega" and "Pioneer—Venus" and results of theoretical studies, current ideas have been discussed about the atmosphere and surface of Venus, as well as the processes taking place on this planet, with emphasis on the comparative-planetological aspects of studies of Venus. In this connection the focus of this book is results of studies of the venusian atmosphere, its chemical composition, thermal regime and dynamics (general circulation of the atmosphere). A detailed analysis has been made of the properties and laws of the venusian cloud cover; the laws of the climate and evolution of the planet have also been considered.

The book might be useful to the reader interested in planetology and geophysical sciences.

В последние годы все более отчетливо обозначается тенденция системности в развитии планетных исследований, состоящая в стремлении к сравнительно-планетологическому анализу результатов, получаемых с помощью автоматических межпланетных станций (АМС), и к соответствующему планированию программ АМС в будущем. Анализ полученных результатов имеет большое значение для более глубокого понимания процессов, происходящих на Земле.

Среди большого числа работ, посвященных сравнительному планетоведению, важное место занимают исследования с использованием данных наблюдений, относящихся главным образом к Венере, Марсу, Юпитеру, Сатурну и спутникам планет-гигантов. В ряде работ, например, показано, что современная тектоника Венеры, характеризуемая вероятной интенсивной вулканической активностью (а следовательно, выбросами внутреннего тепла через небольшое число очагов), сходна с тектоникой древней Земли (около 3 млрд лет назад).

Численное моделирование общей циркуляции атмосферы (ОЦА) на Земле, осуществленное при задании разной скорости вращения планеты, позволило сделать вывод, что основные особенности ОЦА различных планет могут быть объяснены различием их скоростей вращения. Так, например, увеличение периода вращения до 117 сут, соответствующего условиям Венеры, приводит к двум последствиям: 1) сильному уменьшению силы Кориолиса; 2) значительному усилению (за счет медленного вращения) влияния суточного хода инсоляции на формирование локальных очагов нагревания и выхолаживания. Все это обуславливает размытие характерных для Земли циклонов и антициклонов, сужение струйного течения умеренных широт, его сдвиг к полюсам и диссипацию, распространение ячейки Гадлея на всю планету и формирование типичной для Венеры интенсивной зональной (четырёхсуточной) циркуляции в верхней атмосфере. Сокращение периода вращения до 10 ч (аналогия с Юпитером), увеличивая силу Кориолиса, вызывает образование характерной для Юпитера системы перемежающихся полос сильного зонального ветра.

Влияние переноса тепла и количества движения приливами исследовалось ранее для условий земной и венерианской атмосфер. На Земле солнечные суточные приливы порождают значительные зональные ветры в нижней термосфере и могут быть существенным фактором атмосферной циркуляции в мезосфере и верхней стратосфере. Воздействие гораздо более сильных солнечных приливов на Марсе может сказываться и в нижних слоях атмосферы. В связи с этим на основе классической теории приливов были сделаны

расчеты ускорений осредненного потока в марсианской атмосфере, обусловленных солнечными приливами, которые показали, что подобные ускорения, как правило, малы в условиях незапыленной атмосферы, но могут быть существенными в узкой зоне вблизи поверхности планеты и становятся важным фактором глобальной атмосферной циркуляции в условиях пыльных бурь.

Наблюдаемые на Земле и Марсе подветренные волны возникают под действием рельефа; в условиях разреженной марсианской атмосферы это воздействие более существенно, поскольку значительно слабее проявляется затухание волн. Протяженность систем подветренных волн иногда достигает 800 км по направлению ветра от источника генерации волн в зоне полярной шапки зимой. Обычно полоса волн вытянута с запада на восток, тогда как на Земле направления волн более изменчивы. На обеих планетах характерное время существования волн составляет несколько часов, а длина волны равна примерно 30 км, хотя на Марсе наблюдаются и более длинные волны (до 60 км). Специфика земных условий состоит в образовании за препятствием не только волн, но и вихрей Кармана. Обычно подветренные волны на Марсе похожи на дымовой шлейф или имеют стреловидную форму. Для систем земных волн типично наличие вихреобразной структуры. Изучение подветренных волн на Марсе позволяет получить полезные сведения о закономерностях общей циркуляции атмосферы.

Большое внимание привлекли сравнительно-палеоклиматологические исследования, анализ сходства и специфики облаков на различных планетах, попытки рассмотреть процессы на других планетах как имитирующие антропогенное воздействие в земных условиях (это в особенности касается роли пыльных бурь на Марсе).

Одним из важных этапов в изучении Венеры явилось успешное функционирование АМС «Венера-13» и «Венера-14». Это был один из самых сложных за всю историю исследований Венеры комплексных экспериментов по изучению атмосферы и поверхности планеты с помощью спускаемых аппаратов (СА). На каждом СА было установлено 14 научных приборов (без учета аппаратуры для изучения межпланетного поля и околопланетной плазмы, установленной на пролетных аппаратах). С помощью телефотометров впервые были переданы на Землю снятые через красный, зеленый и синий светофильтры полные круговые панорамы поверхности Венеры в местах посадки этих станций. По этим панорамам получены цветные изображения венерианской поверхности. Спускаемые аппараты провели бурение грунта (при температуре 470 °С и давлении у поверхности $93,5 \cdot 10^5$ Па). Раскаленный грунт, добытый буровой установкой, транспортировался по сложной системе трубопроводов внутрь прочного корпуса спускаемого аппарата, где был проведен его химический анализ. Подобного по сложности эксперимента еще не было за всю историю космических исследований. Был определен химический состав грунта в гладком низменном районе Венеры и на холмистой возвышенности, т. е. в ти-

пичных для планеты по рельефу районах, которые в сумме занимают 80 % площади поверхности планеты. Анализ позволил определить содержание в грунте окислов магния, алюминия, кремния, железа, калия, кальция, титана и магния. Впервые измерены электропроводность и механическая прочность грунта, а также выполнен простейший пассивный сейсмический эксперимент.

Программа атмосферных измерений на АМС «Венера-13» и «Венера-14» позволила провести измерение содержания инертных газов аргона, неона, криптона, ксенона и большинства их изотопов, что важно для понимания процесса формирования атмосферы у Венеры, так как большинство изотопов являются реликтовыми, т. е. их содержание не изменялось со времени формирования атмосферы. Проведен эксперимент по измерению ослабления потока солнечного ультрафиолетового излучения на разных высотах в облачном слое планеты. Отмечено очень быстрое ослабление этого потока по мере спуска обоих СА. Кроме традиционных измерений структурных параметров атмосферы, выполнен комплекс измерений содержания серосодержащих и других малых компонентов атмосферы. Эти измерения подтвердили, что сера является основным элементом, определяющим состав венерианских облаков. Получена уникальная информация о планете, которая позволит уточнить существующие представления об этом небесном теле. Особенно это касается поверхности и грунта планеты, а также понимания процессов, которые происходят в атмосфере и в облачном слое Венеры.

Новые успехи планетологии связаны с запусками АМС «Венера-15 и -16», а осуществление программы АМС «Вега-1 и -2» позволило впервые предпринять уникальный эксперимент по прямому измерению скорости ветра в верхней части венерианского облачного покрова путем прослеживания (с использованием глобальной системы радиотелескопов в различных странах) дрейфа аэростатных зондов.

Три планеты земной группы (Венера, Земля, Марс) характеризуются совершенно различными климатами. Особенности каждой планеты обусловлены расстоянием от Солнца, размерами (Марс имеет значительно меньшие размеры, а следовательно, массу и силу тяжести, чем Земля и Венера), направлением и скоростью собственного вращения (Венера имеет обратное по сравнению с Землей и Марсом медленное вращение вокруг оси). Важную роль играют также рельеф, вулканическая активность, антропогенные воздействия (на Земле).

Большой интерес представляет сопоставление условий в атмосферах упомянутых планет для изучения влияния на них внешних факторов (особенно на количество облаков и пыли) и тепловой режим. Несмотря на существенные различия состава атмосфер Земли и двух других планет во всех случаях наиболее важными оптически активными компонентами являются углекислый газ

и водяной пар. По количеству облаков Земля занимает промежуточное место.

Расчеты среднеглобальных вертикальных профилей температуры на основе использования радиационно-конвективной модели (при заданных составе атмосфер и характеристиках облачности) привели к хорошему согласию с данными наблюдений (за исключением термосферы и экзосферы Венеры и, возможно, Марса, которые оказались гораздо холоднее, чем следует из расчетов). Значительно сложнее (даже в случае Земли) обстоит дело с воспроизведением трехмерных полей температуры путем численного моделирования общей циркуляции атмосферы, причем главная трудность связана с учетом взаимодействия радиации и динамики, особенно при исследовании волновых движений различных пространственно-временных масштабов. На Венере остается совершенно неизученным, например, определяющий высокоширотное поле температуры в слое $(0,01 \dots 1) \cdot 10^5$ Па механизм формирования и поддержания циркумполярного «воротничка» — волновые движения планетарных масштабов, обладающие большой интенсивностью и продолжительностью (сходное явление существует и на Марсе).

Интересный пример общего и специфического в изучении атмосфер планет представляет собой «сверхвращение» верхних атмосфер, сущность которого состоит в том, что атмосферы вращаются быстрее самих планет. Сверхвращение является общей особенностью Венеры, Земли, Юпитера и Сатурна (аналогичное явление существует и на Титане). Если, однако, на Венере верхняя атмосфера испытывает сверхвращение подобно твердой оболочке, то для Юпитера и Сатурна характерно наличие перемежающихся (в зависимости от широты) зон супер- и субвращения при четко выраженном сверхвращении в экваториальной зоне. На Сатурне субвращение проявляется редко и слабо (скорость около 20 м/с), тогда как скорость экваториального сверхвращения достигает 500 м/с (половины скорости звука).

Большое внимание привлекло обнаружение по данным АМС «Венера», «Пионер — Венера», «Вояджер» гроз и молний на некоторых планетах (Венера, Юпитер, Сатурн). Так, например, анализ данных спектрометров, установленных на АМС «Венера-9» и «Венера-10», позволил обнаружить район гроз на площади около $5 \cdot 10^4$ км² при повторности молниевых разрядов $2 \cdot 10^{-3}$ см⁻²·с⁻¹, эквивалентной 100 молниям в секунду для планеты в целом; грозы имели место в слое облачности. Оценки энергетических характеристик молний на Венере по данным оптических наблюдений при помощи АМС «Венера-9» и «Венера-10» дали значения суммарной энергии вспышки $8 \cdot 10^8$ Дж, среднего выделения энергии в молниях — 10^{-7} Дж/см², что в 25 раз превосходит соответствующие параметры земных молний. Молнии наблюдались в слое облачности Венеры, а осредненная по планете повторность разрядов в приповерхностном слое атмосферы составляла меньше 5 с⁻¹, если энергия разряда превосходила $4 \cdot 10^5$ Дж, и была меньше 15 с⁻¹

Введение

при энергии $(1 \dots 4) \cdot 10^5$ Дж. Уникальными оказались масштабы грозовой активности на Сатурне. Новые аспекты сравнительно-планетологических исследований возникли в связи с обнаружением рентгеновского излучения планет, с измерениями свечения верхних атмосфер в оптическом диапазоне.

Предлагаемая вниманию читателя монография содержит обобщение современного состояния исследований атмосферы и поверхности Венеры и основана прежде всего на анализе данных АМС, запущенных в последние годы. Венера — ближайшая к Земле планета; ее изучение представляет особый интерес для сравнительной планетологии.

Введение написано авторами совместно, глава 1 — Н. Н. Крупенио и А. С. Селивановым, глава 2 — Н. Н. Крупенио, главы 3—6 — К. Я. Кондратьевым.

Научная аппаратура автоматических межпланетных станций

К концу 50-х годов стало ясно, что наземные методы исследования Венеры не могут дать существенно новой информации. Методы оптической, инфракрасной и ультрафиолетовой астрономии оказались непригодными для исследования подоблачной атмосферы планеты. Наземная радиоастрономия позволяет измерить лишь интегральные характеристики излучения подоблачной атмосферы и поверхности, которые без данных о химическом составе и структурных параметрах подоблачной атмосферы (температура, давление, плотность, скорость ветра) не могут быть надежно и однозначно интерпретированы. Результаты измерения интегральных характеристик отражения в сантиметровом и дециметровом диапазонах позволили предположить наличие в атмосфере планеты компонентов, существенно ослабляющих радиолокационные сигналы трехсантиметрового диапазона. Ответ на вопрос о природе этих компонентов могли дать только прямые измерения в подоблачной атмосфере.

Запуск первых искусственных спутников Земли, а затем посылка первых автоматических межпланетных станций (АМС) к Луне показали возможность изучения Венеры с близких расстояний. На рис. 1.1 представлено обработанное радиолокационное изображение Венеры, полученное при наземной радиолокации планеты на длине волны 3,8 см, на которое нанесены районы посадки АМС.

В феврале 1961 г. в сторону Венеры в Советском Союзе была запущена первая автоматическая межпланетная станция. Она пролетела на 94-е сутки полета на расстоянии около 100 000 км от планеты. Радиосвязь с этой станцией продолжалась до тех пор, пока расстояние до Земли не превысило 3 млн км, и затем прекратилась из-за выхода из строя бортовой аппаратуры.

Прием информации с АМС «Венера-1» и многих других АМС серии «Венера» и «Марс» осуществлялся с помощью антенной системы, установленной в Крыму в Центре дальней космической связи СССР. Эта же антенна использовалась и для радиолокационных исследований планет.

Через 1,5 года в сторону Венеры был запущен американский космический аппарат «Маринер-2». По пути к Венере он исследовал межпланетное магнитное поле, потоки ионизированных частиц, межпланетную плазму и космическую пыль. Установленный на космическом аппарате инфракрасный радиометр ($\lambda_0 = 8,4$ мкм и $\lambda_0 = 10,4$ мкм) и радиотелескоп ($\lambda_0 = 1,35$ см и $\lambda_0 = 1,9$ см) позволили получить тепловую карту верхней границы облаков и измерить распределение радиояркостной температуры вдоль диска планеты на двух длинах волн.

Результаты магнитных измерений показали, что собственное магнитное поле планеты невелико (магнитный момент Венеры не

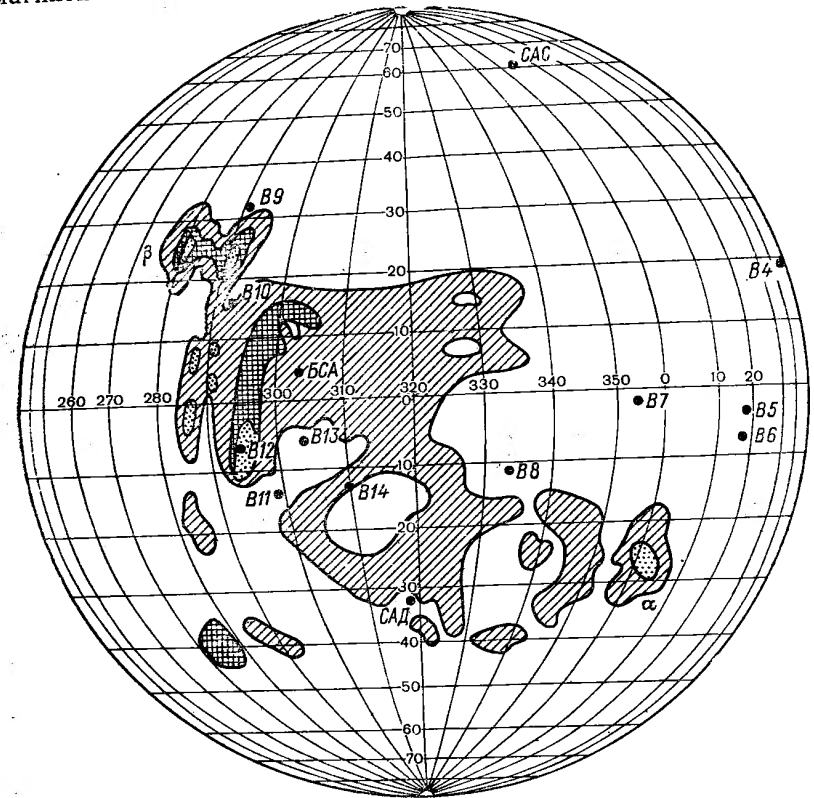


Рис. 1.1. Районы посадок автоматических станций на поверхность Венеры, видимую с Земли в нижнем соединении.

В — спускаемые аппараты советских автоматических межпланетных станций серии «Венера»; БСА, САС, САД — спускаемые аппараты американской межпланетной станции «Пионер-Венера-2»; α, β — области повышенного радиолокационного отражения.

превышает 5—10 % магнитного момента Земли). В связи с отсутствием данных о химическом составе атмосферы результаты измерений радиоизлучения долгое время не получали объяснения. Выбор длин волн радиотелескопа базировался на задаче определения содержания водяного пара в атмосфере, которое предполагалось близким к существующему на Земле. Отсутствие изменения радиоизлучения у края диска по сравнению с его центром в линии водяного пара ($\lambda_0 = 1,35$ см) и измеренные одинаковые радиояркие температуры для освещенной и неосвещенной сторон пла-

неты на длине волны 1,9 см больше поставили вопросов, чем дали ответов. Надежная интерпретация данных этих измерений оказалась возможной лишь в 1974 г., когда в результате полета АМС «Венера» стал известен химический состав атмосферы, а также высотные профили температуры и давления в атмосфере.

По изменению траектории космического аппарата после полета Венеры удалось измерить отношение масс Солнца и планеты $M_{\odot}/M_{\oplus} = 408\,505 \pm 6$ [81]. Эти измерения были сделаны с точностью на 1,5 порядка более высокой, чем точность определения данного параметра путем расчетов методами небесной механики по возмущению движения Венеры другими планетами.

Первые полеты автоматических станций к Венере позволили выявить различия в подходе СССР и США к решению задач исследования Венеры при помощи космических аппаратов. Если специалисты США в качестве основной схемы на первом этапе выбрали схему пролета вблизи планеты, то конструкторы космических аппаратов в СССР поставили основной задачей посадку автоматических станций на поверхность планеты. Эта задача была значительно более сложной и более перспективной.

Вторая автоматическая станция «Венера-2» за счет более точного выведения на траекторию полета к планете пролетела на расстоянии 24 000 км от поверхности Венеры, а третья станция — «Венера-3» за счет применения коррекции траектории осуществила попадание космического аппарата на планету и доставку вымпела на поверхность Венеры. Таким образом, полет АМС «Венера-3» обеспечил отработку бортовых и наземных систем управления для доставки автоматической станции на поверхность планеты.

В 1967 г. в сторону Венеры были запущены две автоматические станции «Венера-4» и «Маринер-5». Автоматическая станция «Венера-4» несла спускаемый аппарат, который отделился перед входом автоматической станции в атмосферу. Автоматическая станция (носитель) сгорела в плотных слоях атмосферы, а спускаемый аппарат на парашюте после аэродинамического торможения плавно спустился в плотные слои атмосферы. Корпус спускаемого аппарата (СА) был рассчитан на внешнее давление до 10^6 Па, так как по существовавшим в ту пору воззрениям наиболее вероятное давление атмосферы у поверхности планеты не должно было превышать $5 \cdot 10^5$ Па. Поэтому при спуске СА на высоте около 26 км его корпус был раздавлен внешним давлением, превышающим предел прочности корпуса ($15 \cdot 10^5$ Па).

На участке спуска в атмосфере станция «Венера-4» провела важные научные исследования. С помощью 11 газоанализаторов были выполнены первые прямые измерения концентрации в атмосфере углекислого газа, водяного пара, азота и кислорода. Эти измерения были проведены на двух высотах, соответствовавших давлению $0,7 \cdot 10^5$ Па ($H=53$ км) и $2 \cdot 10^5$ Па ($H=46$ км).

Самым важным научным достижением автоматической станции «Венера-4» явилось открытие у Венеры углекислой атмосферы с содержанием CO_2 , равным $(90 \pm 10)\%$ (по объему). Следует ска-

зать, что хотя методами инфракрасной спектроскопии (В. Адамс и М. Данхэм, 1932 г.; супруги Конн и др., 1967 г.; Л. Грей и Р. Шорн, 1968 г.; В. И. Мороз, 1967 г.) в надоблачной атмосфере Венеры и была зарегистрирована высокая концентрация углекислого газа (примерно в 3000 раз больше земной), но все же до полета АМС «Венера-4» основным компонентом венерианской атмосферы по аналогии с земной атмосферой ученые считали азот. Открытие углекислой атмосферы Венеры, сделанное учеными Института геохимии и аналитической химии АН СССР под руководством академика А. П. Виноградова, произвело переворот в геохимии Солнечной системы.

Спускаемый аппарат автоматической станции «Венера-4» выполнил измерения температуры, давления и плотности атмосферы на участке спуска в подоблачной атмосфере в диапазоне высот 55—26 км. Показания радиовысотомера спускаемого аппарата позволили сделать предварительный вывод о достижении станцией твердой поверхности планеты (температура 280°C , давление около $15 \cdot 10^5$ Па). Однако последующий более детальный анализ результатов эксперимента с привлечением данных наземных радиоастрономических и радиолокационных измерений, а также данных радиорефракционных измерений, выполненных с помощью пролетного аппарата «Маринер-5», показал, что СА «Венера-4» могла осуществить посадку лишь на 22—26-километровую вершину горы (если бы подобная гора могла существовать на Венере). Рассмотрение прочностных характеристик корпуса СА привело конструкторов автоматической станции к выводу, что из-за превышения внешним давлением предела прочности произошла разгерметизация СА, вследствие чего вышел из строя бортовой передатчик СА. С помощью системы манометрических датчиков и термосопротивлений был впервые получен высотный профиль температуры и давления на участке спуска длиной около 25 км. Эти измерения показали, что температура изменяется от 40 до 280°C , а давление от $1 \cdot 10^5$ до $15 \cdot 10^5$ Па.

На СА «Венера-4» был установлен ионизационный плотномер, который регистрировал увеличение плотности атмосферы с уменьшением высоты. Данные прямых измерений плотности атмосферы хорошо совпали с результатами расчета плотности по данным прямых измерений температуры, давления и химического состава атмосферы. Однако в диапазоне высот 36—41 км было отмечено повышение плотности атмосферы. Проведенный спустя несколько лет детальный анализ этого явления вместе с лабораторными калибровками прибора и измерениями показал, что повышенное значение плотности в этом диапазоне высот является следствием турбулизации атмосферы в районе нижней границы облачного слоя.

Пролетевший вблизи планеты на следующий день после посадки СА «Венера-4» космический аппарат «Маринер-5» провел

целую серию измерений межпланетной и околопланетной плазмы и магнитного поля. Изменение траектории полета станции после пролета Венеры позволило получить более точное значение отношения массы Солнца к массе планеты, чем это было сделано во время пролета АМС «Маринер-2».

Измерения рефракции и ослабления радиоволн на длине волн 12,5 см позволили построить дневной и ночной высотные профили температуры и давления в диапазоне высот 90—35 км (35 км — предельная высота, на которой наступает сверхрефракция, и радиоволна от космического аппарата не достигает Земли), а также высотные профили концентрации электронов в дневной верхней атмосфере. Эти измерения позволили открыть у Венеры ионосферу — ионизированный слой, максимальная концентрация электронов в котором составила $(5...6) \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ на расстоянии 6190 км от центра планеты (высота над поверхностью — 140 км). Дневная ионосфера прослеживалась в диапазоне высот 115—200 км.

В январе 1969 г. в сторону Венеры были запущены две советские автоматические станции «Венера-5» и «Венера-6». Корпуса их спускаемых аппаратов были прочнее, чем корпус СА «Венера-4». Это позволило станциям провести измерения до высоты, равной 19 км. АМС «Венера-5» и «Венера-6» практически повторили комплекс измерений, ранее проведенный с помощью АМС «Венера-4», а также осуществили посадку на ночной стороне планеты. На СА «Венера-5, -6» была несколько изменена программа измерений химического состава атмосферы с помощью газоанализаторов (измерения были проведены при давлениях $0,6 \cdot 10^5$; $2,5 \cdot 10^5$ и 10^6 Па). Была также повышена точность измерений содержания углекислого газа, водяного пара и кислорода.

Результаты полета АМС «Венера-5, -6» подтвердили выводы относительно основного состава атмосферы, сделанные после полета «Венеры-4». Концентрация углекислого газа в атмосфере (по объему) составляет $97 \pm 1\%$, азота (вместе с аргоном) — не более 3,5 %, кислорода — не более 0,1 %; концентрация водяного пара в диапазоне высот 46—54 км по данным измерений составила 0,3—2 %. Результаты полета АМС «Венера-4, -5, -6» показали, что для проведения измерений в нижней атмосфере и на поверхности необходимо создание спускаемых аппаратов, выдерживающих внешнее давление до 10^7 Па и имеющих хорошую теплоизоляцию, которая позволяет бортовой аппаратуре СА работать при температуре до 750 К (примерно 480 °C).

Такая конструкция СА была установлена на борту АМС «Венера-7» в 1970 г. Эта автоматическая станция достигла Венеры 15 декабря 1970 г. и провела измерения не только во всей толще атмосферы, но и на поверхности в течение 53 мин. Из-за возникшей неисправности телеметрическая система СА непрерывно измеряла только один параметр — температуру атмосферы, которая у поверхности оказалась близкой к 750 К.

На повестку дня встала задача разработки венерианской автоматической станции, способной проводить более широкий круг научных исследований. Такой автоматической станцией нового поколения стала АМС «Венера-8» (1972 г.). С помощью спускаемого аппарата этой станции, кроме традиционных измерений температуры и давления атмосферы, были впервые проведены разносторонние исследования атмосферы и поверхности. С помощью фотометра был получен вертикальный разрез освещенности в атмосфере. Эти измерения показали, что, несмотря на сплошной облачный покров, освещенность вблизи поверхности достаточно велика (соответствует земной в пасмурный день). С помощью 160-канального гамма-спектрометра найдено содержание радиоактивных элементов в грунте планеты, что позволило определить, к какому типу породы относится венерианский грунт.

Газоанализаторы спускаемого аппарата зафиксировали значительное содержание аммиака в атмосфере. С помощью радиовысотомера, работавшего на длине волны $\lambda_0 = 35 \text{ см}$, были не только получены данные о высотах полета на участке спуска СА, но и определено значение диэлектрической проницаемости грунта, а также измерен рельеф поверхности планеты Венера в районе посадки.

При передаче телеметрической информации со спускаемых аппаратов «Венера-4» — «Венера-8» использовалась прямая схема передачи с СА на Землю. Измерение на наземном пункте приема значений несущей частоты передатчиков спускаемых аппаратов позволило по доплеровскому смещению частоты определить скорость движения СА в атмосфере. Это дало возможность при привлечении баллистических характеристик СА рассчитать горизонтальную скорость ветра в атмосфере на разных высотах (при точности измерения $\pm 1 \text{ м/с}$). Такие же измерения производились при всех последующих полетах спускаемых аппаратов станций «Венера». Скорость ветра на высотах около 50 км оказалась близкой к скорости меридионального движения самого верхнего облачного покрова (около 100 м/с), которое было зарегистрировано при помощи наземного фотографирования Венеры в ультрафиолетовой области спектра.

Запущенный в ноябре 1973 г. американский пролетный аппарат «Маринер-10» позволил получить много новой информации о структуре и динамике облачного слоя планеты. При пролете вблизи планеты с помощью двух телевизионных камер в течение восьми суток было получено 3 400 высококачественных телевизионных изображений с линейным разрешением по поверхности лучше 130 км. При фотографировании использовались ультрафиолетовый ($\lambda_0 = 0,355 \text{ мкм}$), голубой ($\lambda_0 = 0,474 \text{ мкм}$), оранжевый ($\lambda_0 = 0,578 \text{ мкм}$) и ультрафиолетовый поляризационный светофильтры ($\lambda_0 = 0,358 \text{ мкм}$). Телевизионный кадр состоял из 800 строк с 832 элементами в каждой строке.

Установленный на борту «Маринера-10» ИК радиометр (длины волн 8—14 и 35—55 мкм) позволил измерить распределение яркостных температур по диску планеты. Эти данные затем использовались для оценки теплового режима верхней границы облаков. С помощью двух ультрафиолетовых спектрометров ($\lambda_0 = 0,02 \dots 0,17$ мкм) было проведено измерение содержания в верхней атмосфере планеты атомарного водорода, гелия, кислорода, углерода, а также неона и аргона.

Электростатические анализаторы позволили определить плотность электронов в верхней атмосфере и их температуру. По этим данным температура экзосферы оказалась ниже 400 К. Анализ возмущения траектории АМС после пролета Венеры позволил получить наиболее точное отношение масс Солнца и планеты ($408\,523,9 \pm 1,2$) [113], а это дало возможность определить ее среднюю плотность с точностью до четвертого знака ($\rho_{\text{ср}} = 5,269 \pm 0,002$ г/см³).

Накопленный опыт космических исследований Венеры позволил советским инженерам в 1975 г. провести весьма сложный эксперимент: запуск первого искусственного спутника Венеры с предварительным отделением от него тяжелого спускаемого аппарата (массой 1560 кг), обеспечивающего работу научной аппаратуры на поверхности (АМС «Венера-9» и «Венера-10»). В этом эксперименте было применено новое техническое решение: ретрансляция сигнала со спускаемого аппарата на Землю через искусственный спутник Венеры. Это позволило прежде всего коренным образом улучшить характеристики канала связи с СА. Скорость передачи возросла более чем в 200 раз и соответственно увеличился объем передаваемой с СА информации, что позволило поставить ряд новых научных экспериментов и существенно усовершенствовать проведение «старых», т. е. ставших традиционными для СА. Кроме того, появилась возможность осуществлять связь с СА, находящимися на невидимой с Земли стороне Венеры, в данном случае на стороне, освещенной Солнцем.

Таким образом, было выполнено необходимое условие для осуществления эксперимента, ставшего одним из основных на станциях «Венера-9» и «Венера-10», а именно для получения изображений поверхности планеты с СА. Как и все телевизионные эксперименты, он прежде всего требовал повышенной скорости передачи информации по каналу связи. Что касается второго условия проведения этого эксперимента — наличия необходимой освещенности поверхности, — то оно было недостаточно изученным. Данные об освещенности, полученные ранее с «Венеры-8», относились не к поверхности, а к атмосфере, так как датчик освещенности, установленный на СА «Венера-8», был направлен вверх. Оптические характеристики поверхности, такие, как альbedo, контрасты, не были определены даже ориентировочно. Незнание физических свойств поверхности и непосредственно поверхностного атмосферного слоя, наличие сильно рассеивающей атмосферы ставили под сомнение успех эксперимента. Для случая неблагоприятной ситуа-

ции было предусмотрено искусственное освещение отдельных участков поверхности вблизи СА в течение короткого времени.

Эксперимент прошел успешно. Были получены две панорамы поверхности около станций «Венера-9» и «Венера-10», точки посадки которых разнесены больше чем на 2000 км. Районы посадки различались по геологическому строению. Изображения передавались с помощью оптико-механических телевизионных камер (сканирующих телефотометров) в монохромном виде с линейным разрешением по поверхности в ближней точке около 6 мм (характеристики камер даны в табл. 1.1). Обработка изображений (рис. 1.2) позволила впервые получить данные о микроструктуре поверхности, альbedo и контрастах ее элементов, а также способствовала правильной интерпретации данных других экспериментов.

Таблица 1.1

Характеристики телевизионных камер

Характеристика	«Венера-9, -10»	«Венера-13, -14»
Угол зрения, ...°	40 × 180	37 × 180
Угловое разрешение, мин	21	11
Количество элементов в строке	115	211
Количество строк в панораме	517	1000
Количество передаваемых граций	64	512
Спектральный диапазон, мкм	0,4—0,6	0,42—0,47 0,51—0,57 0,6—0,66 0,4—0,6
Скорость передачи информации, бит/с	256	3072
Время передачи полной панорамы, мин	30	14

С помощью научной аппаратуры, установленной на спускаемых аппаратах «Венера-9, -10», было определено содержание урана, тория и изотопа калия ⁴⁰K. С помощью гамма-плотнометра была определена плотность одного из камней, находившихся в поле зрения телекамеры СА «Венера-10». На участке спуска изучались структура облачного слоя, скорость ветра, содержание водяного пара, освещенность, температура и давление в атмосфере.

Научная аппаратура искусственных спутников «Венера-9, -10» позволила получить важную информацию о температурном режиме и структуре верхней границы облаков и надоблачной дымки, о составе и температурном режиме верхней атмосферы, а также провести в ограниченном объеме съемку облачного слоя в УФ диапазоне.

Следует отметить, что снимки, ранее полученные с «Маринера-10», охватывали сравнительно короткий интервал времени. Так как по наземным данным облачный покров Венеры характеризуется

непостоянством деталей вплоть до их полного исчезновения, необходимо было установить, в какой мере наблюдавшиеся «Маринер-10» облачная структура и картина атмосферной циркуляции типичны для облачного слоя Венеры. Поэтому важной задачей было более длительное исследование изменчивости как атмосферы в целом, так и ее отдельных областей, которое представляется перспективным проводить с помощью телевизионных камер, установленных на спутнике Венеры. Это было сделано на орбитальном аппарате (ОА) «Венера-9», а затем «Пионер — Ве-

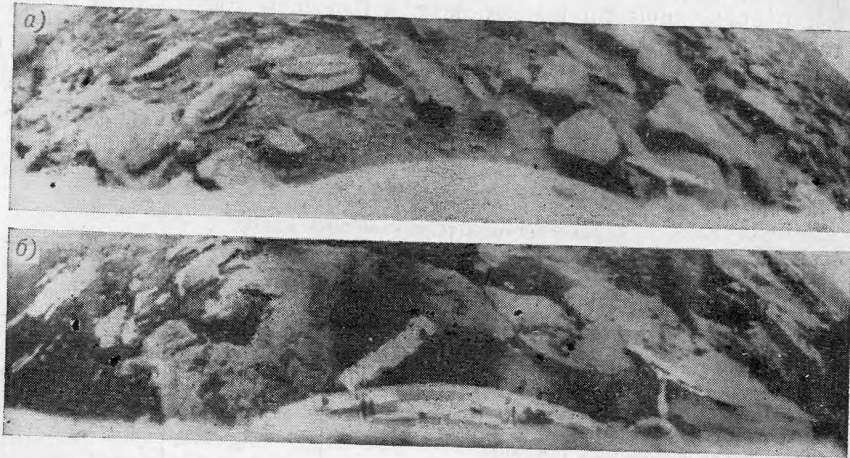


Рис. 1.2. Панорамы поверхности Венеры, полученные с помощью спускаемых аппаратов «Венера-9» (а) и «Венера-10» (б).

нера-1». В задачи эксперимента на ОА «Венера-9» входила в основном патрульная съемка фрагментов облачного слоя Венеры в двух спектральных диапазонах: ультрафиолетовом (0,35—0,38 мкм) и фиолетовом (0,36—0,45 мкм). Один условный кадр имел 256 элементов в строке при 500 строках в кадре.

Съемка велась на восходящей или нисходящей ветвях орбиты. С 26 октября по 25 декабря 1975 г. было проведено 17 сеансов съемки. Расстояние до планеты при съемке составляло от 6500 до 30 000 км, разрешение менялось соответственно от 6,5 до 30 км. С помощью бистатической радиолокации, осуществляемой с искусственного спутника «Венера-9», были получены данные о рельефе поверхности, диэлектрической проницаемости грунта, и для нескольких районов построены радиолокационные карты. Проведенное одночастотное радиопросвечивание атмосферы позволило получить информацию о вертикальном распределении температуры, давления и плотности в атмосфере в диапазоне высот 90—35 км в 50 различных районах планеты. Двухчастотное радиопросвечивание дало много новой информации о температуре и concentra-

ции электронов в ионосфере, об изменчивости этих параметров в зависимости от условий освещения планеты Солнцем.

Установленный на борту искусственных спутников «Венера-9, -10» комплекс приборов (магнитометр, плазменный спектрометр и ловушки заряженных частиц) позволил провести исследования взаимодействия солнечного ветра с планетой.

В 1978 г. к Венере были запущены четыре автоматические станции: «Венера-11», «Венера-12», «Пионер — Венера-1» и «Пионер — Венера-2». «Венера-11» и «Венера-12» — идентичные автоматические станции, состоящие из спускаемого и пролетного аппаратов. Пролетные аппараты этих станций использовались как для проведения самостоятельных научных измерений, так и в качестве ретрансляторов телеметрической информации СА. Спускаемые аппараты осуществили посадку на освещенную и невидимую с Земли часть поверхности планеты 21 декабря («Венера-12») и 25 декабря («Венера-11») 1978 г.

Во время спуска станций «Венера-11, -12» в атмосфере планеты проводились эксперименты по исследованию тонкого химического состава атмосферы, теплового баланса атмосферы и изучению природы облаков. Для этого был использован комплекс приборов, включавший масс-спектрометр, газовый хроматограф, оптический спектрометр и фотометр, нефелометр, рентгеновский флуоресцентный спектрометр, прибор для измерения электрической активности атмосферы. Кроме того, были выполнены измерения температуры, давления и аэродинамических перегрузок.

Запущенная 20 мая 1978 г. американская АМС «Пионер — Венера-1» была выведена на сильно вытянутую почти полярную орбиту искусственного спутника Венеры 4 декабря 1978 г.; АМС «Пионер — Венера-2» с установленными на ней спускаемыми аппаратами была запущена 8 августа 1978 г. и достигла планеты 9 декабря 1978 г. Диапазон высот перицентра АМС «Пионер — Венера-1» был выбран с учетом обеспечения возможности прямых измерений в верхней атмосфере и ионосфере и функционирования радиолокатора для картирования поверхности планеты. В течение 17 витков перицентр оставался на дневной стороне, пересек терминатор на 18-м витке и оставался на ночной стороне до 130-го витка (13 апреля 1979 г.).

Один большой СА (БСА) и три малых СА: «север» (САС), «день» (САД) и «ночь» (САН) — были запущены с носителя по направлению к Венере. Носитель вошел в верхнюю атмосферу Венеры и функционировал лишь в течение 64 с (в диапазоне высот 200—110 км). Только один САД передавал информацию с поверхности планеты в течение 67 мин, остальные СА прекратили работу на высоте около 13 км над поверхностью планеты.

Очень важным обстоятельством явился благоприятный обзор с ОА района входа СА в южном полушарии и участка северного полушария за 1—2 ч до выхода в точку перицентра. Научная про-

грамма АМС «Пионер — Венера» включала 12 экспериментов на искусственном спутнике Венеры (ИСВ), два — на носителе, семь — на БСА и по три идентичных эксперимента на каждом из малых СА. В дополнение к этому осуществлялись наблюдения методом радиопросвечивания атмосферы и другие радиофизические эксперименты.

Научная программа спускаемых аппаратов «Венера-11» и «Венера-12» включала 9 экспериментов по изучению атмосферы. Пролетные аппараты этих автоматических станций выполнили 6 экспериментов по изучению межпланетной и околопланетной плазмы, потоков протонов и альфа-частиц, а также гамма-всплесков космического происхождения.

Спускаемые аппараты «Венера-11», «Венера-12» и «Пионер — Венера-2» детально исследовали химический состав газовой и аэрозольной составляющих атмосферы, измерили структуру и концентрацию частиц облачного слоя и их коэффициенты преломления, определили структурные параметры атмосферы (температуру, давление, плотность, скорость ветра) почти одновременно в шести различных районах при разных условиях освещенности Солнцем, обеспечили получение данных о высотном распределении рассеянного солнечного излучения в атмосфере. Установленный на СА «Венера-11 (-12)» приемник длинноволнового излучения (прибор «Гроза») зарегистрировал спорадическое (импульсное) радиоизлучение в атмосфере, которое является следствием электрических разрядов в атмосфере планеты.

Комплекс научных приборов, установленный на борту искусственного спутника «Пионер — Венера-1», позволил провести исследования поверхности и более точно определить размеры планеты, получить новые данные о взаимодействии солнечного ветра с планетой.

Комплексные измерения, проведенные на искусственном спутнике «Пионер—Венера-1» и спускаемых аппаратах «Венера-11», «Венера-12» и «Пионер—Венера-2» позволили изучить тепловой баланс в атмосфере; динамику, циркуляцию и турбулентность атмосферы; получить новые данные о составе и структуре атмосферы и облачного слоя. Были обнаружены некоторые расхождения в показаниях различных приборов этого комплекса и приборов, устанавливавшихся на предыдущих космических аппаратах. Особенно это касается содержания и высотного распределения водяного пара, а также содержания кислорода в атмосфере.

Проведенный в 1978 г. комплексный эксперимент по изучению Венеры с помощью четырех автоматических станций дал много новой информации об этой планете и показал, что дальнейшие усилия следует направить на более детальное исследование твердого покрова и внутреннего строения планеты.

В марте 1982 г. был осуществлен один из самых сложных за всю историю Венеры комплексных экспериментов по исследованию атмосферы и поверхности планеты с помощью спускаемых аппаратов «Венера-13» и «Венера-14». На каждом из них было уста-

новлено по 14 научных приборов, не считая приборов для изучения межпланетного поля и околопланетной плазмы, установленных на пролетных аппаратах.

Дальнейшее совершенствование системы ретрансляции сигнала с СА, включая ввод в Крыму в Центре дальней космической связи 70-метровой антенны — самой большой в мире антенны такого класса, обеспечило на станциях «Венера-11, -12, -13, -14» увеличение скорости передачи информации в 12 раз, что позволило установить большой комплекс научных приборов и увеличить объем и точность экспериментов. С помощью телефотометров впервые на Землю были переданы снятые через стандартные красный, зеленый и синий светофильтры полные круговые панорамы поверхности Венеры в местах посадки станций. По этим панорамам были синтезированы цветные изображения венерианской поверхности в естественных цветах, т. е. в таких, какими бы их видел человек. Венера предстала перед нами в коричнево-зеленоватых тонах. Такая цветовая гамма объясняется прежде всего особенностями освещения на поверхности Венеры, атмосфера которой практически подавляет синюю составляющую спектра солнечного излучения и создает избыток желто-зеленой части спектра. Наряду с цветной осуществлялась черно-белая передача панорам в интегральном видовом диапазоне (рис. 1.3).

Качество изображений, полученных с «Венеры-13» и «Венеры-14», было значительно лучше качества изображений, полученных с «Венеры-9» и «Венеры-10»; увеличилась разрешающая способность, число передаваемых градаций (см. табл. 1.1). Анализ изображений дал дополнительные сведения о микроструктуре поверхности в новых районах планеты и ее оптических характеристиках. За время работы СА «Венера-13» и «Венера-14» на поверхности (127 и 57 мин соответственно) были отмечены вариации освещенности, что является, по всей вероятности, следствием временной изменчивости оптической плотности облаков.

Одним из наиболее важных научных экспериментов, выполненных на спускаемых аппаратах «Венера-13» и «Венера-14», было взятие с помощью бурильных установок образцов венерианского грунта и проведение его химического анализа. Образцы грунта были взяты в гладком низменном районе Венеры и на холмистой возвышенности, т. е. в типичных для планеты по рельефу районах, которые в сумме занимают 80 % площади поверхности планеты. Анализ позволил определить содержание в грунте окислов магния, алюминия, кремния, железа, калия, кальция, титана и магния. Измерения проводились путем облучения добытого образца грунта радиоактивными изотопами железа (^{55}Fe) и свинца (^{238}Pb). С помощью счетчиков регистрировался спектр рентгеновского излучения грунта, т. е. проводился рентгенофлуоресцентный анализ. Результаты измерений подтвердили данные, полученные более грубыми методами на автоматических станциях «Венера-8, -9 и -10»

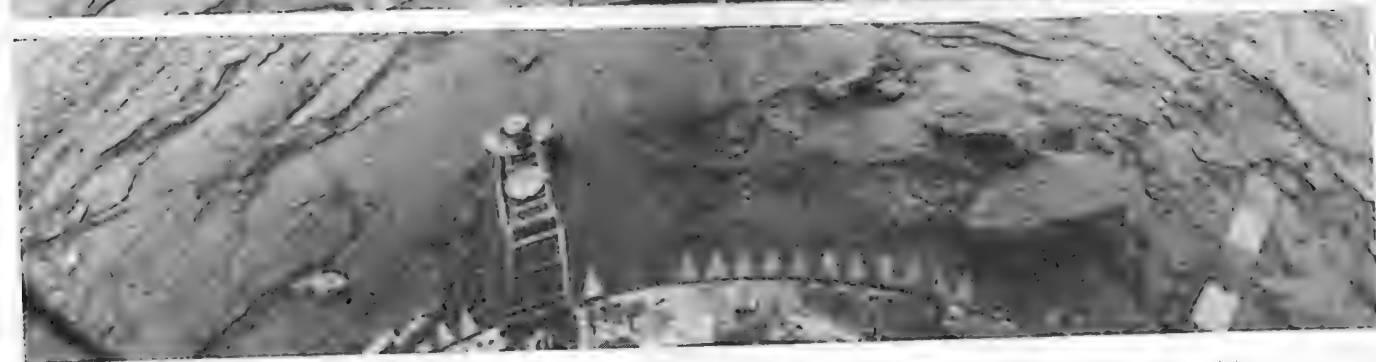
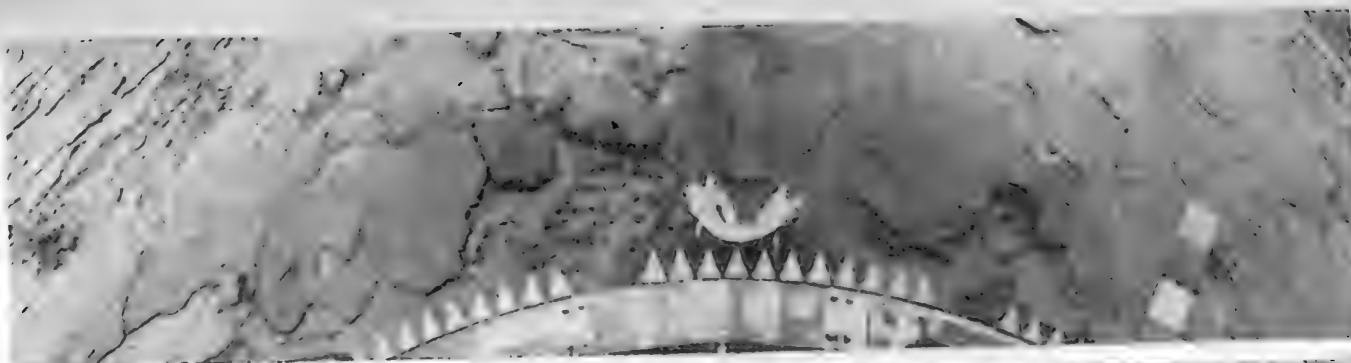


Рис. 1.3. Панорамы поверхности Венеры, полученные со станций «Венера-13» (а) и «Венера-14» (б).

с помощью гамма-спектрометров: грунт Венеры представлен магматическими породами разного типа, которые похожи на породы земной коры. Так, в месте посадки «Венеры-13» обнаружены меланократовые щелочные габброиды, сравнительно редко встречающиеся на Земле (на океанических островах и в рифтовых зонах Средиземноморья), а в месте посадки «Венеры-14» — базальты, сходные с широко распространенными толеиговыми базальтами океанической коры Земли.

Автоматические станции «Венера-13» и «Венера-14» впервые измерили электропроводность и механическую прочность грунта, а также выполнили простейший пассивный сейсмический эксперимент. Программа атмосферных измерений на этих станциях позволила провести измерение содержания инертных газов: аргона, неона, криптона, ксенона и большинства их изотопов, что важно для понимания процесса формирования атмосферы Венеры, так как большинство изотопов являются реликтовыми, т. е. их содержание не изменилось со времени создания планетной атмосферы.

С помощью этих станций был проведен эксперимент по измерению ослабления потока солнечного ультрафиолетового излучения на разных высотах в облачном слое планеты. Было отмечено очень быстрое ослабление этого потока по мере спуска обеих автоматических станций. Кроме традиционных измерений структурных параметров атмосферы был выполнен комплекс измерений содержания серосодержащих и других малых компонентов атмосферы. Эти измерения подтвердили, что сера является основным элементом, определяющим состав венерианских облаков. Результаты одновременных измерений концентрации водяного пара на разных высотах прямым и спектроскопическим методом значительно расходятся, как это имело место и при сопоставлении результатов измерений АМС «Венера-11 и -12» и «Пионер—Венера». Несомненно, что определение концентрации такого важного компонента атмосферы Венеры, как водяной пар, дело не простое и требует более тонких измерений.

В октябре 1983 г. на эллиптические орбиты спутников Венеры были выведены две АМС: «Венера-15» и «Венера-16». Основной задачей космического эксперимента, продолжавшегося около года, было получение радиолокационных и радиотепловых изображений поверхности планеты, измерение профиля высот по трассе полета АМС, а также исследование локальных характеристик отражения планеты в радиодиапазоне.

Бортовой радиолокатор бокового обзора с синтезированной апертурой, установленный на АМС, в районе перигентра с высоты 2000 км за время одного сеанса работы (16 мин) производил съемку полосы поверхности длиной 7—8 тыс. км и шириной около 150 км. Разрешение на местности составляло 1—2 км и было примерно таким, какое имел бы человеческий глаз при наблюдении поверхности с данной орбиты. Съемка начиналась на широте 80°, затем трасса проходила вблизи северного полюса Венеры и далее шла примерно вдоль меридиана до широты 30°. Со временем

вследствие вращения Венеры съемка охватила район северного полушария начиная с широты 30°. Из-за перекрытия полос съемки, особенно вблизи полюса, оказалось возможным стереоскопическое наблюдение поверхности. Большой объем информации от радиолокаторов АМС «Венера-15, -16» был передан со скоростью 100 тыс. бит/с по усовершенствованному радиоканалу в Центр дальней космической связи в Крыму и на радиоастрономическую станцию в поселке Медвежий Озера (под Москвой), оборудованные антенными системами с диаметрами зеркал соответственно 70 и 64 м.

На АМС «Венера-15, -16» кроме радиолокатора с синтезированной апертурой были установлены и другие научные приборы: поляризационный радиотелескоп дециметрового диапазона для дистанционного измерения температуры грунта и электромагнитных свойств грунта Венеры; инфракрасный фурье-спектрометр для регистрации спектра излучения надоблачной атмосферы в диапазоне 5—35 мкм и получения данных о ее температуре и содержании отдельных компонентов. Осуществлялось также исследование ионосферы и околосолнечной плазмы методом радиопросвечивания на трех длинах волн (32, 8 и 5 см) путем использования штатной аппаратуры АМС и дополнительного передатчика. Наличие двух искусственных спутников, работавших по одинаковой программе, но сдвинутой по времени, позволило повысить надежность получения информации, исключить пропуски участков поверхности при картографировании и получить дополнительную информацию для повышения точности всех измерений.

При помощи фурье-спектрометров, разработанных в АН ГДР и установленных на АМС «Венера-15 и -16», сотрудниками АН ГДР с участием советских ученых были получены и обработаны ИК спектры Венеры в области 280—1500 см⁻¹ со спектральным разрешением до 5 см⁻¹ и пространственным разрешением 60 км на уровне облачного слоя. По спектрограммам впервые были восстановлены высотные профили температуры в интервале 60—90 км и зарегистрированы линии вращательной полосы Н₂О. Трассы измерений проходили примерно через полюс, пересекая терминатор, охватывая широты примерно от 20 до 87° как на ночной, так и на дневной стороне.

С помощью бортового радиотелескопа дециметрового диапазона получена тепловая карта практически всего северного полушария (выше 6° с. ш.). На ней отмечены три больших района, где радиояркие температуры, зарегистрированные радиотелескопом, ниже средневенерианских (около 500 °С). Это приподнятые районы Гор Максвелла, β и γ. Обращает на себя внимание общая асимметрия теплового поля грунта планеты в северном полушарии, что является следствием различия рельефа, теплофизических и электромагнитных характеристик грунта в разных районах планеты.

В декабре 1984 г. с интервалом в 6 сут в Советском Союзе были запущены идентичные автоматические межпланетные станции «Вега-1» и «Вега-2». Каждая из этих станций состояла из пролетного и спускаемого аппаратов. Целью запуска явилось исследование Венеры с помощью пролетных аппаратов и изучение кометы Галлея с помощью пролетных аппаратов с расстояния около 10 000 км. Спускаемый аппарат состоял из аэростатного зонда и посадочного аппарата. За двое суток до входа в атмосферу Венеры от пролетного аппарата отделился спускаемый аппарат, который при входе в атмосферу планеты разделился на аэростатный зонд и посадочный аппарат.

11 и 15 июля 1985 г. впервые в атмосфере Венеры наполнились гелием оболочки аэростатов диаметром 3,4 м (200 лет назад, в 1783 г., подобный эксперимент был выполнен на Земле братьями Жозефом и Жаком Монгольфье). Аэростатные зонды, рассчитанные на работу в течение двух земных суток, несли комплекс метеоприборов (датчик давления; два датчика температуры, разнесенные по высоте на 12 м; анемометр для измерения вертикального компонента скорости ветра), нефелометр для измерения объемной плотности аэрозоля на высоте плавания аэростата (53—55 км) и индикатор наличия световых вспышек.

С помощью бортовых передатчиков пролетных аппаратов и плавающих аэростатных зондов методом радиоинтерферометрии с большой базой определялись координаты и компоненты скорости движения аэростатов. При этом использовались две независимые сети, состоящие из 17 наземных радиотелескопов, расположенных на территории СССР, Европы, Северной и Южной Америки, Австралии, Африки.

На каждом посадочном аппарате имелся комплекс из девяти приборов для исследования характеристик атмосферы и поверхности планеты. С помощью этого комплекса измерялись структурные параметры атмосферы, химический состав газового и аэрозольного компонентов атмосферы, плотность и распределение по размерам частиц аэрозоля на разных высотах, влажность атмосферы. С использованием рентгенофлуоресцентного анализа и гамма-спектрометра изучалось содержание в грунте основных элементов от магния до железа, а также урана, тория и изотопа калия (^{40}K).

С помощью космических аппаратов был выполнен целый ряд уникальных экспериментов. Перечень пионерских измерений физических характеристик планеты Венера и ее околопланетного пространства дан в табл. 1.2.

Количество научных приборов, устанавливаемых на борту космических аппаратов, и научная направленность исследований определяются целым рядом факторов. Основным фактором при определении научных задач космической миссии является вклад научных экспериментов в углубление наших знаний о происхождении и эволюции изучаемой планеты, о свойствах ее недр, поверхности и атмосферы. Эта фундаментальная задача изучения проис-

Таблица 1.2
Перечень пионерских измерений

	Автоматическая станция	Год проведения измерения
Исследование околопланетной плазмы и магнитного поля вблизи планеты	«Маринер-2»	1962
Измерение локального радиоизлучения планеты в сантиметровом диапазоне	«Маринер-2»	1962
Обнаружение углекислой атмосферы	«Венера-4»	1967
Прямое измерение температуры и давления в подоблачной атмосфере ($H=26 \dots 55$ км)	«Венера-4»	1967
Измерение скорости ветра в атмосфере	«Венера-4»	1967
Обнаружение у планеты водородной короны	«Венера-4», «Маринер-5»	1967
Обнаружение у планеты ионосферы	«Маринер-5»	1967
Прямое измерение содержания азота и водяного пара в подоблачной атмосфере	«Венера-5, -6»	1969
Прямое измерение температуры поверхности	«Венера-7»	1970
Измерение освещенности в подоблачной атмосфере и на поверхности	«Венера-8»	1972
Прямое измерение давления у поверхности	«Венера-8»	1972
Изучение основного химического состава вещества поверхности (содержание U, K, Th)	«Венера-8»	1972
Радиолокационное исследование рельефа и характеристик грунта в районе посадки	«Венера-8»	1972
Изучение динамики облачного покрова и изменение высоты верхней границы облаков	«Маринер-10»	1974
Бистатическое радиолокационное картографирование поверхности с космического аппарата	«Венера-10»	1975
Получение панорам поверхности в местах посадки СА и изучение морфологии при линейном разрешении в несколько сантиметров	«Венера-9, -10»	1975
Измерение плотности грунта	«Венера-10»	1975
Прямое измерение скорости ветра у поверхности	«Венера-9, -10»	1975
Обнаружение пыли на поверхности	«Венера-9, -10»	1975
Изучение тепловой асимметрии верхней границы облаков	«Венера-9, -10»	1975
Измерение структуры и коэффициента преломления аэрозольной составляющей атмосферы и облаков	«Венера-9, -10»	1975
Прямое измерение нейтрального и ионного состава верхней атмосферы	«Пионер—Венера-1, -2»	1978
Определение структуры уходящего теплового излучения планеты и теплового баланса в атмосфере	«Пионер—Венера-1, -2»	1978
Доказательство отсутствия у планеты собственного магнитного поля	«Пионер—Венера-1, -2»	1978
Измерение содержания малых компонентов атмосферы, включая их изотопы	«Венера-11, -12», «Пионер—Венера-1, -2»	1978
Обнаружение спорадического длинноволнового радиоизлучения (электрических разрядов) в атмосфере	«Венера-11, -12», «Пионер—Венера-1, -2»	1978
Обнаружение тектонической деятельности на планете	«Пионер—Венера-1»	1978
Обнаружение кратеров ударного происхождения на поверхности планеты	«Пионер—Венера-1»	1978

	Автоматическая станция	Год проведения измерений
Получение топографической карты планеты среднего разрешения, охватывающей до 90 % поверхности	«Пионер—Венера-1» совместно с наземными радиолокаторами	1978—1979
Получение цветного изображения поверхности и венерианского неба	«Венера-13, -14»	1982
Обнаружение временной изменчивости освещенности на поверхности	«Венера-13, -14»	1982
Определение элементного состава грунта	«Венера-13, -14»	1982
Проведение сейсмических измерений на поверхности	«Венера-13, -14»	1982
Одновременное измерение содержания водяного пара в атмосфере прямыми и спектроскопическими методами	«Венера-13, -14»	1982
Измерение содержания в атмосфере инертных газов и большинства их изотопов	«Венера-13, -14»	1982
Измерение электропроводности и механической прочности грунта	«Венера-13, -14»	1982
Измерение содержания в атмосфере ряда малых молекулярных компонентов	«Венера-13, -14»	1982
Подтверждение того, что сера является основным элементом, определяющим состав облачного слоя	«Венера-13, -14»	1982
Измерение ослабления ультрафиолетового излучения Солнца внутри облачного слоя	«Венера-13, -14»	1982
Радиолокационная съемка поверхности северного полушария планеты с высоким пространственным разрешением	«Венера-15, -16»	1984
Получение радиотепловых карт поверхности северного полушария планеты с высоким разрешением	«Венера-15, -16»	1984
Проведение радиовысотометрирования и построение топографических карт северного полушария планеты	«Венера-15, -16»	1984
Длительное определение метеопараметров и циркуляции атмосферы на высоте 53—55 км	«Вега-1, -2»	1985
Исследование характеристик аэрозоля на высоте 53—55 км на большой базе	«Вега-1, -2»	1985

хождения и эволюции планеты состоит из совокупности частных задач, решаемых путем постепенного перехода от простого к более сложному.

Комплекс современных знаний о планете и существующие возможности ракетно-космической техники определяют на каждом этапе научную направленность космических исследований Венеры. Одним из существенных ограничений являются баллистические ограничения. Они приводят к необходимости минимизации массы, габаритов и энергетических характеристик научных приборов. Эти требования являются общими для всех приборов, используемых в космических экспериментах. Но есть требования, специфические для венерианской исследовательской аппаратуры, устанавливаемой на борту спускаемых аппаратов.

Крайне сложной задачей является создание приборов, надежно работающих на поверхности Венеры (температура около 500 °С, давление около 10⁷ Па). Потребовались большое количество технических новшеств, разработка новых материалов и технологий, позволивших обеспечить работу некоторых видов научных приборов непосредственно на поверхности в течение часа и более. Например, панорамные телевизионные камеры, защищенные от внешних воздействий путем установки в герметичном отсеке со специальными иллюминаторами, имели элементы разворачивающих устройств, работающие при высокой температуре. Защита наиболее термочувствительных элементов этих камер осуществлялась с помощью эффективных теплопоглотителей («Венера-9, -10, -13, -14»). Оригинальные грунтозаборные устройства («Венера-13, -14», «Вега-1, -2»), работающие непосредственно во внешней среде, производили бурение грунта. Раскаленный грунт по системе трубопроводов транспортировался внутрь герметичного отсека, где проводился анализ его химического состава.

Максимальное время работы спускаемого аппарата на поверхности составило 127 мин («Венера-13»), после чего прекратилась радиосвязь. Можно предположить, что спускаемый аппарат работал примерно в 1,5 раза дольше.

Уровень развития космической техники позволяет на современном этапе ставить и более сложные задачи. Так, десять лет назад проект создания длительно действующих на поверхности Венеры автоматических станций казался утопичным. В наши дни, благодаря прогрессу в области материаловедения, радиоэлектроники и теплофизики, задача создания автоматической станции, выдерживающей температуры до 500 °С, уже не кажется нереальной.

Научные приборы всех работавших венерианских автоматических станций по предмету исследования можно разделить на 3 группы: 1) для изучения верхней атмосферы и околопланетного пространства, 2) для изучения облачного покрова и нижней атмосферы, 3) для изучения поверхности и недр планеты.

К первой группе приборов можно отнести следующие: ультрафиолетовые фотометры для изучения водородной короны планеты и атомарного кислорода в верхней атмосфере, магнитометры для исследования околопланетного магнитного поля и околопланетных плазменных процессов, различные измерители характеристик околопланетной и межпланетной плазмы (ловушки заряженных частиц, измерители электронной температуры, плазменные спектрометры и др.), измерители радиационной обстановки и космических лучей солнечного и галактического происхождения, приборы для определения химического состава верхней атмосферы и ряд других приборов.

Ко второй группе относятся различные приборы для получения изображения и изучения оптических характеристик облачного покрова и атмосферы, измерители структурных параметров атмо-

сферы (термометры, датчики давления и скорости ветра, измерители плотности атмосферы), измерители химического состава газовой и аэрозольной составляющих атмосферы (газоанализаторы, газовые хроматографы, масс-спектрометры, рентгенофлуоресцентные спектрометры и др.), измерители структуры облачных частиц (ИК спектрометры, фотополяриметры, нефелометры и др.), измерители электрической (грозовой) активности атмосферы.

К третьей группе приборов относятся: панорамные телефотометрические и телевизионные устройства, радиолокационные измерители рельефа (радиовысотометры), радиолокаторы бокового обзора, радиотелескопы, измерители электромагнитных характеристик и плотности грунта, гамма-плотнометры, измерители физико-механических свойств грунта, сейсмографы.

Глава 2

Поверхность и внутреннее строение Венеры

2.1. Общепланетарные характеристики

Венера является второй по расстоянию от Солнца планетой. Она совершает один оборот вокруг Солнца за 224,7 сут (сидерический период) со средней орбитальной скоростью 35,03 км/с. Орбита Венеры почти круговая; ее эксцентриситет — самый малый среди планет Солнечной системы — равен 0,0068. Среднее расстояние от Венеры до Солнца равно 108,21 млн км, что составляет 0,72333 астрономической единицы — среднего расстояния между центрами Земли и Солнца. Орбита Венеры наклонена к плоскости эклиптики на $3^{\circ}23'39''$.

Венера единственная планета Солнечной системы, которая имеет обратное направление вращения, т. е. противоположное движению планеты вокруг Солнца. (Планета Уран также имеет необычное вращение; она вращается «боком», так как у нее плоскость орбиты составляет с плоскостью экватора угол 98°). Период собственного вращения планеты Венера, определенный по наиболее точным наземным радиолокационным наблюдениям, равен $243 \pm 0,1$ [117]; $243,06 \pm 0,05$ [92] или $242,98 \pm 0,04$ [20] земных суток, что близко к резонансному периоду вращения ($243,16$ сут), когда земной наблюдатель видит в нижнем соединении один и тот же венерианский меридиан в подземной точке ($\lambda = 320^{\circ}$).

По решению конгресса Международного астрономического союза в 1970 г. в качестве расчетного периода вращения принято значение, равное 243 сут. Угловая скорость вращения Венеры составляет $2,99 \cdot 10^{-7}$ рад/с (Земли — $7,292 \cdot 10^{-5}$ рад/с). Средний синодический период обращения — интервалы времени между двумя нижними соединениями, когда расстояние между Землей и Венерой минимально, — равен 583,9 сут. Вследствие обратного и медленного вращения солнечные сутки на Венере длятся 116,8 земных суток. Таким образом, в венерианском году всего 1,92 венерианских суток. Наклон оси вращения планеты к плоскости орбиты составляет $(90 \pm 3)^{\circ}$. Из-за незначительности эксцентриситета орбиты и малого наклона плоскости экватора относительно плоскости орбиты на Венере не бывает смены времен года, т. е. в отличие от Земли поток солнечной энергии на данной широте практически не зависит от времени.

Форма Венеры мало отличается от сферы (табл. 2. 1). Ее средний радиус, по данным наиболее точных измерений, выполненных на ИС «Пионер—Венера-1», равен $(6051,5 \pm 0,1)$ км, что составляет 0,949 земного радиуса [127]. Геометрическое сжатие Венеры (полярное) равно $1,8 \cdot 10^{-5}$, т. е. полярный радиус меньше среднего экваториального всего на 0,1 км (у Земли полярное сжатие равно $3,35 \cdot 10^{-3}$, т. е. больше, чем у Венеры в 186 раз). Из-за малой угловой скорости вращения Венеры ее динамическое сжатие

Таблица 2.1
Форма Венеры

Параметр	Вариант 1	Вариант 2
Размер большой полуоси А, км	6052,02±0,1	6051,34±0,1
Размер малой полуоси В, км	6050,99±0,14	6051,02±0,12
Размер полярной полуоси С, км	6051,54±0,1	6051,23±0,11
Разность экваториальных полуосей (А—В), км	1,03±0,1	0,32±0,1
Средний экваториальный радиус, км	6051,5±0,12	6051,18±0,1
Экваториальное сжатие	$(17±1,8) \cdot 10^{-5}$	$(5,3±1,7) \cdot 10^{-5}$
Полярное сжатие	$(-1±3) \cdot 10^{-5}$	$(-1±2) \cdot 10^{-5}$
Долгота большой полуоси, ...°	9±8	351±21
Отклонение центра эллипсоида от центра масс, км	0,43±0,12	0,26±0,12
Направление отклонения центра эллипсоида от центра масс, ...°		
широта	-15±10	-47±22
долгота	154±10	199±26

Примечание. Вариант 1 включает результаты определения локальных высот всех измеренных точек; вариант 2 включает результаты определения локальных высот точек, для которых значения локального радиуса менее 6052 км.

мало и равно $(4±1,4) \cdot 10^{-5}$. Разность полуосей аппроксимирующего экваториального эллипса составляет $(1,1±0,4)$ км (у Земли эта разность равна 200 м). Центр фигуры планеты смещен относительно центра массы на $(430±120)$ м в направлении от Земли в нижнем соединении [134]. Максимальный перепад высот на планете по данным радиолокационных измерений составляет 13 км [127].

По данным измерений изменения траектории полета АМС «Маринер-10» вблизи планеты, отношение массы Солнца $(1,9282 \cdot 10^{33}$ г) к массе Венеры равно $408523,9±1,2$, следовательно, масса Венеры составляет $(4,8692±0,0008) \cdot 10^{27}$ г, т. е. отношение массы Венеры к массе Земли равно 0,81 [113]. Средняя плотность вещества планеты равна $(5,247±0,002)$ г/см³, что составляет 0,95 средней плотности вещества Земли. Объем твердой части планеты равен $0,93 \cdot 10^{27}$ см³, что эквивалентно 0,859 объема Земли. Собственное магнитное поле у планеты отсутствует. Ускорение свободного падения на экваторе равно 8,6 м/с².

2.2. Рельеф

Как уже было отмечено, облачный покров Венеры не позволил применить такие классические оптические методы наземных наблюдений для изучения рельефа, как изменение формы лимба планеты и изменение теней, отбрасываемых горными массивами, при

изменении высоты Солнца. Единственным методом изучения рельефа при наземных наблюдениях явилась радиолокация. Космические методы определения рельефа добавляют к дистанционным радиофизическим методам (радиолокация и поляризационная радиометрия) еще фотографические методы при измерении у поверхности в районах посадок космических аппаратов.

Первые наземные радиолокационные измерения рельефа планеты были проведены в 1967 г. во время нижнего соединения Сми-

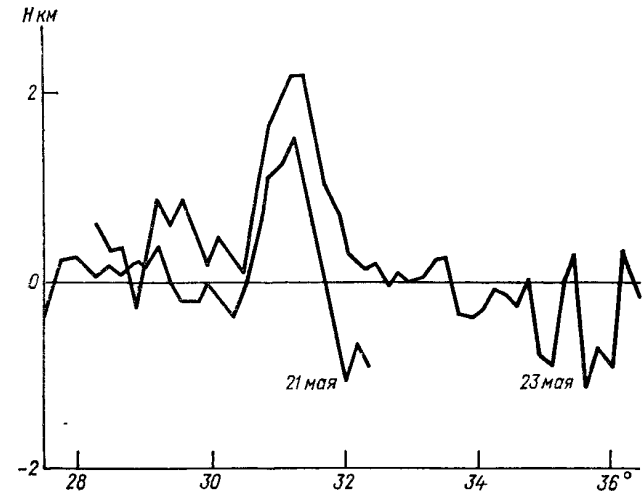


Рис. 2.1. Высотный профиль поверхности Венеры.

том, Ингалсом и другими [144] на длине волны 3,8 см. В результате этих измерений была обнаружена 2-километровая возвышенность, имеющая протяженность около 150 км. Эта возвышенность находилась на долготе примерно 300° в экваториальном районе планеты. Подобные измерения рельефа поверхности с помощью наземной радиолокации проводились затем во время всех нижних соединений, когда расстояние от Венеры до Земли минимально и поэтому обеспечиваются наилучшие энергетические условия проведения измерений.

На рис. 2.1 показаны результаты измерений высотного профиля поверхности Венеры, проведенные Смитом и др. на длине волны 3,8 см в радиолокационной обсерватории Хайстек (США) 21 и 23 мая 1969 г. Трассы подрадарной точки в этих измерениях практически совпадали. Как видно, наблюдается хорошая корреляция измеренных форм рельефа: возвышенности 1,5—2 км на долготе 31° и впадины на долготе 29—30°.

В радиолокационных обсерваториях Хайстек и Аресибо (о. Пуэрто-Рико) в 1967—1970 гг. (начиная с августа 1967 г.) на длинах

волн 3,8 и 70 см были проведены радиолокационные измерения высот в течение восьми полных оборотов Венеры относительно наземного наблюдателя. За это время широта подрадарной точки изменилась от -9 до $+10^\circ$. Если в первых измерениях точность измерения высоты была хуже 1 км, то в последних измерениях точность была доведена до 150 м. В ходе измерений была обнаружена огромная возвышенная область протяженностью около 6000 км по долготе и 500 км по широте. Она поднималась примерно на 3 км над средним уровнем поверхности планеты. Средний угол наклона составлял около $0,5^\circ$. Значения высот в экваториальной области, полученные на разных оборотах планеты (и соответственно при разной широте подрадарной точки), отличаются друг от друга не более чем на 500 м; перепад высот не превосходит 5 км, в среднем составляет 2—3 км.

Использование планетного радиолокатора Центра дальней космической связи США в Голдстоуне, имеющего диаметр антенны 64 м, позволило Гольдштейну и др. [106—108] провести радиолокационное картографирование поверхности Венеры на длине волны 12,5 см. С помощью этих измерений получены не только карты отражательной способности, но и карты рельефа. Карты имеют разрешение по поверхности около 10 км в 15 районах, диаметр каждого из которых составляет примерно 1500 км (рис. 2.2). Для 8 районов были построены гипсометрические карты с разрешением по высоте 500 м и точностью измерения перепада высот 220 м. В результате измерений были обнаружены перепады высот до 2,5 км. Одна из гипсометрических карт приведена на рис. 2.3. Оценка перепада высот была сделана Роджерсом и др. [139] по вариациям интенсивности отраженного сигнала на длине волны 3,8 см в зависимости от долготы подрадарной точки. Радиоволны этого диапазона ослабляются при распространении в атмосфере планеты, следовательно, чем ниже поверхность в районе подрадарной точки, тем за счет большей толщи атмосферы происходит ослабление радиоволны. Поэтому, используя данные о химическом составе атмосферы, градиентах давления и температуры в нижней атмосфере, Роджерс, Ингалс и Райнвайл [139] оценили возможные перепады высот, считая, что коэффициент отражения радиоволн не зависит от долготы подрадарной точки; они получили максимальный перепад высот, равный 8 км.

А. Д. Кузьмин [48], анализируя результаты измерения перепада высот на поверхности планеты, сделал вывод, что высокая температура Венеры по сравнению с температурой Земли, условия прочности и вязкости предполагаемого материала поверхности и более глубоких слоев делают маловероятным наличие на Венере гор высотой более 10 км. Это было подтверждено результатами радиолокационных измерений, проведенных на искусственных спутниках «Пионер — Венера-1» и «Венера-15, -16».

Перепады высот на поверхности Венеры с использованием космических аппаратов определялись четырьмя методами. Первый метод заключался в измерении давления у поверхности в районах

посадок автоматических станций и определении перепада высот между точками посадок различных станций по градиенту давле-

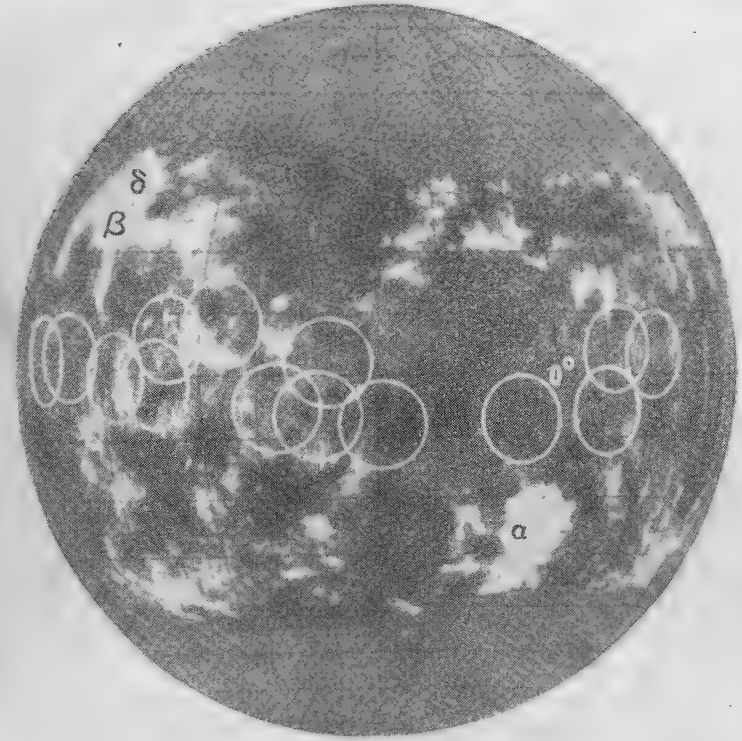


Рис. 2.2. Районы локального радиолокационного картографирования ($\lambda_0 = 12,5$ см) поверхности Венеры (1972—1975 гг.).

Круги нанесены на радиолокационную карту ($\lambda_0 = 12,5$ см) малого разрешения (1969—1970 гг.); α, β, δ — области повышенного радиолокационного отражения.

ния, полученного из модели атмосферы. При таком методе определения перепад высот между районами посадок автоматических станций не превышает 2 км.

Второй метод заключается в измерении текущей высоты полета спускающейся автоматической станции. Этот метод был использован группой советских ученых под руководством М. В. Башмачникова [10] при посадке автоматической станции «Венера-8», параметры движения которой по горизонтали определялись путем

измерения на Земле доплеровской частоты сигнала передатчика спускаемого аппарата. Результаты измеренного высотного профиля поверхности планеты вдоль трассы посадки показаны на рис. 2.4 (район посадки имеет координаты $\varphi = 10^\circ$ ю. ш., $\lambda = 332^\circ$).

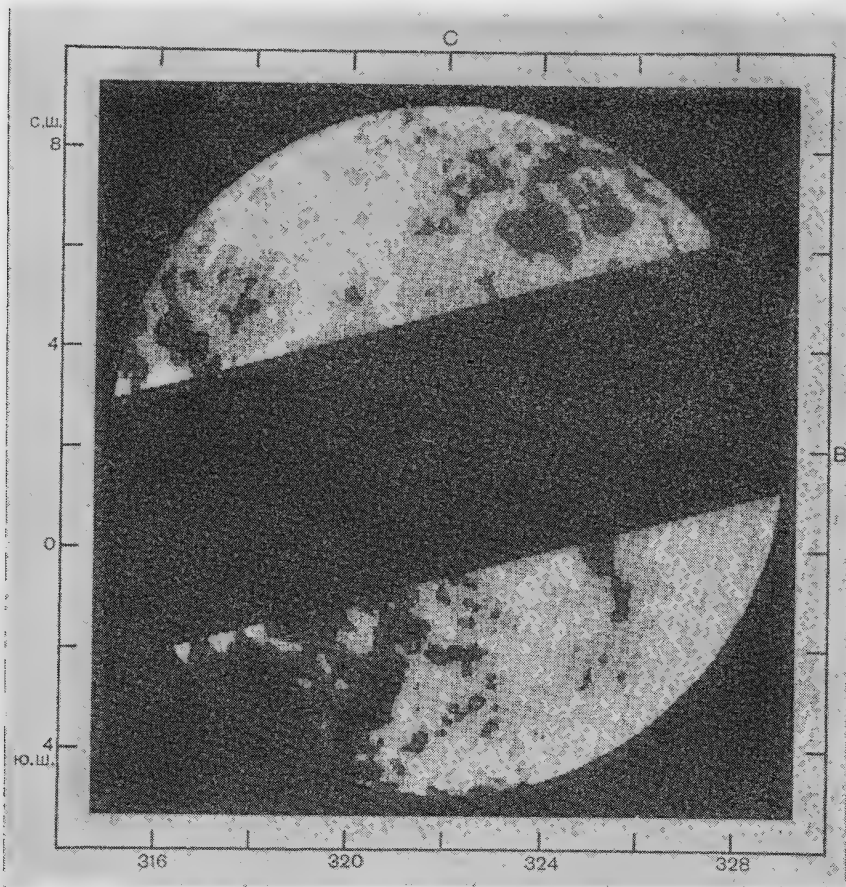


Рис. 2.3. Гипсометрическая карта участка поверхности Венеры, полученная при наземной радиолокации ($\lambda_0 = 12,5$ см).

Как видно из этого рисунка, перепад высот на трассе длиной 60 км составил 3,3 км, т. е. средний угол наклона оказался равным 3° . На одном из участков этой трассы протяженностью 1,25 км был измерен перепад высот в 1,5 км, что соответствовало среднему наклону более 52° (это значительно выше, чем на Луне; плато Прямая стена на Луне имеет наклон, равный примерно 40°).

Третий метод использовался при проведении группой ученых под руководством О. И. Яковлева [80] бистатистических радиолока-

ционных измерений с искусственного спутника «Венера-10». Он заключался в том, что поверхность Венеры облучалась передатчиком станции «Венера-10», а отраженный от поверхности сигнал принимался и обрабатывался в Центре дальней космической связи в Крыму. Доплеровская частота, соответствующая максимуму в спектре отраженного сигнала, соответствует точке зеркального отражения. Сопоставление этой частоты со значением доплеровской частоты, взятой для того же момента времени для сферической поверхности планеты, позволило определить локальные пе-

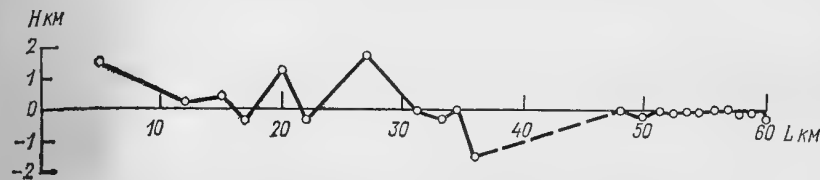


Рис. 2.4. Высотный профиль поверхности Венеры, полученный при помощи радиовысотомера спускаемого аппарата «Венера-8».

репады высот для точек зеркального отражения и путем дальнейшей обработки получить радиолокационные изображения. Таким образом, для трех трасс измерений были построены высотные профили поверхности, один из которых показан на рис. 2.5.

Бистатистическая радиолокация, проведенная со спутника «Венера-10» на длине волны 32 см, позволила выявить ряд холмистых образований высотой 2—3 км и протяженностью 30—40 км, имеющих крутизну склонов $6-7^\circ$. В других районах были обнаружены и более резкие перепады высот рельефа с углами наклона $10-18^\circ$, и очень гладкие равнинные участки поверхности с углами наклона от $1-2$ до $3-4^\circ$. Бистатистическая радиолокация с ИСВ «Венера-10» позволила также получить радиолокационные изображения двух участков поверхности.

Четвертый метод — радиовысотометрический — впервые был применен группой Петтенджилла [134] на искусственном спутнике «Пионер—Венера-1». Затем этот метод был использован А. Ф. Богомоловым, В. А. Котельниковым и др. [13] на ИСВ «Венера-15, -16». С помощью импульсного бортового радиолокатора ИСВ «Пионер—Венера-1», работающего на длине волны 17 см, в то время, когда его антенна направлялась в направлении надир (по нормали к поверхности), проводилось измерение высот полета по запаздыванию отраженного от поверхности сигнала относительно зондирующего излученного импульса его передатчика. Антенна этого радиолокатора была неподвижно укреплена на корпусе искусственного спутника, который вращался с постоянной скоростью вокруг собственной оси с периодом, равным 12 с. Время работы радиолокатора в режиме измерения высоты состав-

ляло 0,8 с. Радиолокатор измерял высоту полета с ошибкой не более 100 м до высот, равных 4700 км. Для привязки результатов измерения высоты к географическим координатам планеты была использована высокоточная система привязки момента измерения ко времени, которая имела ошибку, не превышающую 0,023 с. В районе перицентра орбиты, где орбитальная скорость искусствен-

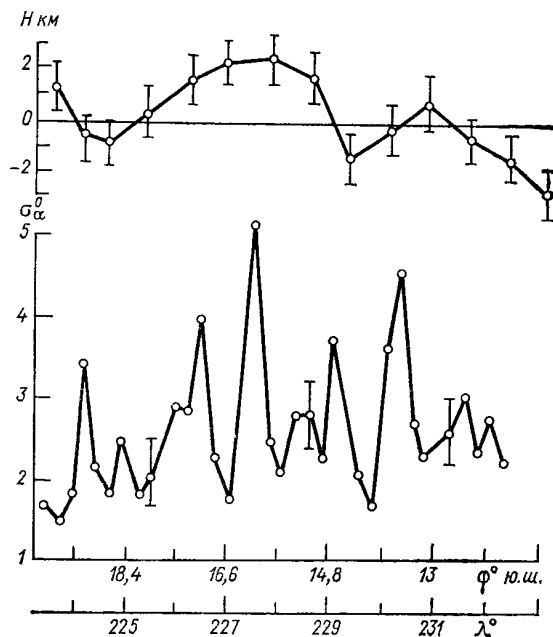


Рис. 2.5. Высотный профиль поверхности и значения среднеквадратичных углов наклона σ_α поверхности Венеры по данным бистатической радиолокации с ИСВ «Венера-10» ($\lambda_0 = 32$ см).

ного спутника была равна 4,4 км/с, этим данным соответствовала ошибка в определении положения вдоль поверхности, равная 100 м. Периодичность измерения высоты полета в районе перицентра орбиты соответствовала 50 км линейного расстояния вдоль трассы движения следа подспутниковой точки. Измерения высот были выполнены за первые двое венерианских суток для 80 % всей площади поверхности (между $\phi = 63^\circ$ ю. ш. и $\phi = 74^\circ$ с. ш.). За счет смещения трасс движения следа подспутниковой точки на разных витках орбиты из-за собственного вращения планеты был получен сдвиг между следами соседних витков, равный примерно 150 км. За счет эффекта осреднения при измерении высоты разрешаемый элемент поверхности, для которого осуществлялось измерение высот, имел размеры 8 км вдоль трассы и 30 км поперек трассы движения следа подспутниковой точки.

Проведенные радиолокационные измерения высот позволили определить средний радиус планеты, который оказался равным $6051,5 \pm 0,2$ км. Это значение отличается от экваториального радиуса планеты ($6050 \pm 0,3$ км), который ранее был определен по наземным радиолокационным и радиоинтерферометрическим наблюдениям при худшем пространственном разрешении. На рис. 2.6 приведены результаты радиовысотометрических измерений, выполненных с помощью искусственного спутника «Пионер—Венера-1».

По данным радиовысотометрирования с ИСВ «Пионер—Венера-1» на поверхности планеты были обнаружены впадины, плато и горные хребты. Максимальный перепад высот поверхности составил 13 км. Это больше, чем предполагалось ранее из условия изостатического равновесия литосферы; следовательно, толщина венерианской коры также должна быть больше, чем это считалось ранее. По оценкам, толщина коры должны превышать 100 км, что примерно в 3 раза больше средней толщины земной коры. Уточнение значения среднего радиуса планеты в сторону увеличения (раньше в большинстве моделей планеты использовалось значение радиуса 6050 км, хотя существовали модели и со значением среднего радиуса до 6052 км) позволяет хорошо согласовать атмосферные параметры планеты (высотные профили температуры, давления и химический состав) с частотной зависимостью результатов наземных радиофизических измерений в сантиметровом и дециметровом диапазонах. При среднем радиусе планеты, равном 6050 км, эти данные плохо согласовывались.

Средние углы наклона на поверхности Венеры невелики. Наземная радиолокация, позволившая измерить перепады высот, относит их к базам в несколько сотен километров и усредняет высоты по площади с линейным размером 100 км и более. По этим данным, максимальные углы наклона поверхности на базе 1000 км составляют $1,2^\circ$, что примерно соответствует значению этого параметра для Луны. Радиовысотометрия, выполненная на искусственном спутнике «Пионер—Венера-1», показала, что на базе примерно 100 км углы наклона в горных районах не превышают 5° при разрешении по поверхности около 30 км.

Мелкомасштабный рельеф поверхности Венеры с успехом изучался по фотопанорамам, полученным в местах посадки спускаемых аппаратов АМС «Венера-9», «Венера-10», «Венера-13», «Венера-14». Фотографии, полученные группой советских ученых и инженеров под руководством А. С. Селиванова [66] при посадках автоматических станций «Венера-9», «Венера-10», «Венера-13» и «Венера-14» на поверхность планеты, дали важную информацию о структуре поверхности уже в более крупном масштабе, чем это сделала радиолокация. Места посадки спускаемых аппаратов «Венера-9», «Венера-10», «Венера-13» и «Венера-14» отличаются друг от друга по своим геолого-морфологическим характеристикам.

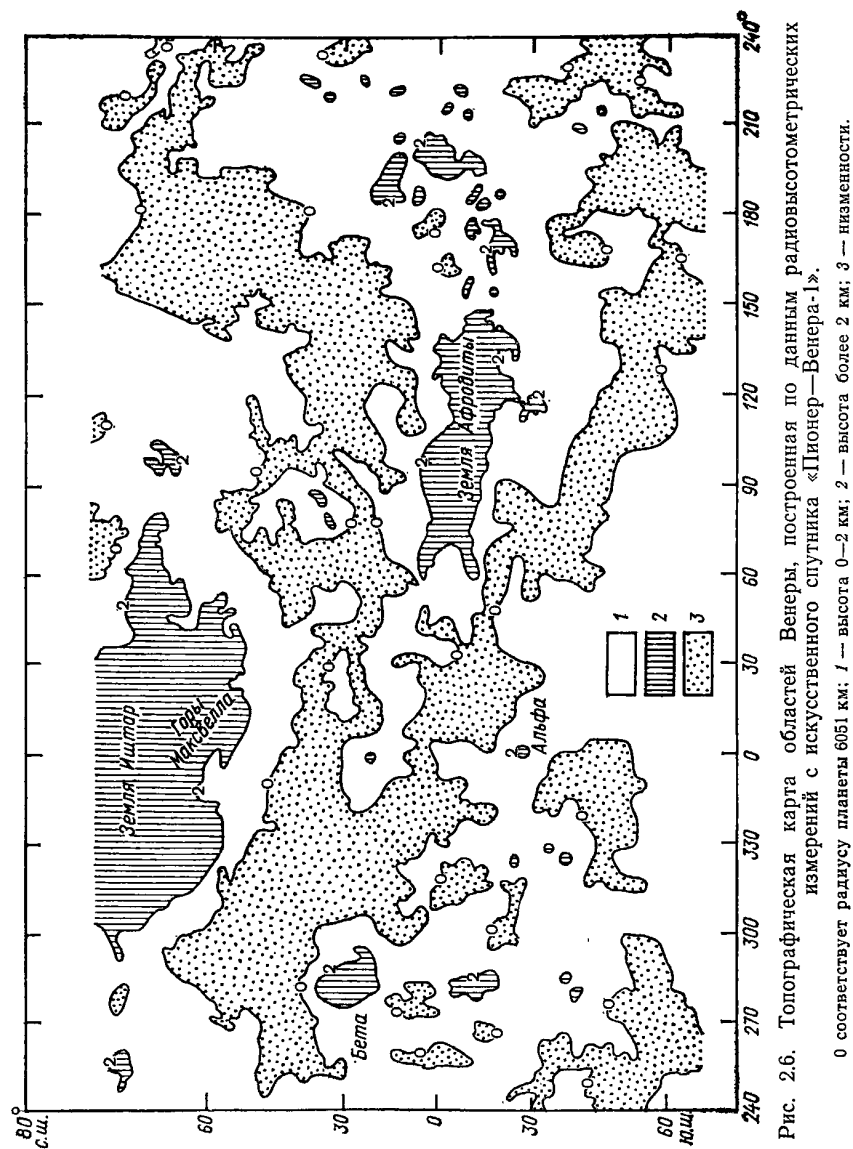


Рис. 2.6. Топографическая карта областей Венеры, построенная по данным радиовысотометрических измерений с искусственного спутника «Пионер-Венера-1».

О соответствует радиусу планеты 6051 км; 1 — высота 0—2 км; 2 — высота более 2 км; 3 — изменности.

В месте посадки СА «Венера-9» обнаружена россыпь камней с преобладающими размерами несколько десятков сантиметров. Многие камни имеют острые углы и края, что говорит о геологической молодости этого участка поверхности [75]. Анализ панорамы, переданной спускаемым аппаратом «Венера-9», показал, что посадка осуществлена на поверхность, имеющую на протяжении 2—3 км угол наклона, равный 25° . Это вполне естественно, так как с уменьшением базы и увеличением разрешения по поверхности угол наклона на одном и том же участке может существенно возрасти.

Место посадки СА «Венера-10» оказалось более ровным со слабо возвышающимися каменными глыбами, поверхность между которыми была покрыта слоем мелкозернистого грунта. Выходы скальных пород в этом районе имеют сглаженные ребра и пятнистую изъязвленную поверхность, что свидетельствует о геологической зрелости данного участка поверхности и о существовании процессов эрозии коренных горных пород на поверхности Венеры. Фотография этого района подтверждает вывод Н. Н. Крупенио [41] о наличии раздробленной породы на поверхности планеты, который был им сделан в результате анализа наземных радиолокационных измерений.

Автоматическая станция «Венера-13» осуществила посадку в седловине между невысокими возвышенностями с пологими склонами. Около спускаемого аппарата и вдали от него поверхность покрыта плоскими светлыми каменными плитами, которые возвышаются над окружающей поверхностью всего на несколько сантиметров. Эти плиты имеют трещины, заполненные темным грунтом. Плиты имеют ярковыраженную горизонтальную слоистость, наблюдающуюся и на панорамах СА «Венера-9, -10» (толщина отдельных слоев 1—5 см), и, по мнению ученых, являются выходами коренных пород. Горизонтальные размеры плит достигают нескольких метров. Между плитами находится темный грунт, содержащий обломки светлых камней. Грунт является продуктом разрушения более плотных плит — консолидированных пород. Обломки размером более 5 см — плоские, а более мелкие камни имеют неправильную форму.

По мнению советских ученых — геоморфологов К. П. Флоренского и А. Т. Базилевского [77], — место посадки «Венеры-13» очень похоже на место посадки «Венеры-10». Грунт в месте посадки «Венеры-13» внешне схож с грунтом в местах посадки «Венеры-9» и «Венеры-10». Он заметно темнее окружающих его каменных плит, рыхлый и довольно тонкозернистый. На посадочное кольцо спускаемого аппарата при посадке попало много частиц, наиболее мелкие из которых были постепенно сдuty ветром [69]. При посадке аппарата было поднято пылевое облако, которое сохранялось в течение 10 с. Такое облако могло состоять из частиц значительно меньше 1 мм [60]. По оценкам ученых, тол-

щина слоя рыхлого грунта в месте посадки станции не превышает нескольких десятков сантиметров.

«Венера-14» осуществила посадку на довольно ровную плоскую скальную поверхность в низменном районе планеты. Поверхность в месте посадки станции состоит из практически сплошных плоских плит, между которыми отсутствует темный мелкораздробленный грунт, тогда как на панорамах СА «Венера-9, -10, -13» он занимает около 50 % площади наблюдаемой поверхности. Грунт в месте посадки СА «Венера-14» наблюдается лишь в виде небольших темных скоплений во впадинах на плитах. Плиты имеют ярко выраженную слоистость с довольно большим числом слоев. Так, на одной из плит ученые насчитали 12 слоев. Толщина каждого слоя составляет 1—3 см. Отдельные слои отличаются друг от друга по тону (более светлые и более темные). В местах посадки станций «Венера-9», «Венера-10», «Венера-13» и «Венера-14» поверхность представляет собой плоские плиты со слоистой структурой. По мнению советских ученых, эти породы являются осадочными породами, образовавшимися в результате отложения и и литификации тонкозернистого материала.

Обнаружение разных в геологическом отношении структур на поверхности в местах посадки автоматических станций является еще одним свидетельством активных геологических процессов на планете, протекавших сравнительно недавно, а возможно, протекающих и в настоящее время.

Наземная радиолокация, а также бистатистические радиолокационные измерения позволили определить мелкомасштабный рельеф для баз, примерно в 200 раз больших, чем та длина волн, на которой проводились подобные измерения. Если результаты определения так называемых среднеквадратичных углов наклона поверхности — σ_α — относились в основном к экваториальной области планеты, то данные бистатистических радиолокационных измерений относились к трассам движения точки зеркального отражения в области 13—26° с. ш. [80], причем каждое измерение являлось результатом усреднения в пятне на поверхности диаметром в несколько десятков километров. Бистатистическая радиолокация проводилась на длине волны 32 см. Таким образом, результаты измерения углов наклона соответствовали базе примерно 65 м.

Наземная радиолокация Венеры, проведенная в диапазоне длин волн 3,6—70 см, позволила для приэкваториальной зоны определить частотную зависимость параметра σ_α . Сравнение этой зависимости, полученной Н. Н. Крупенин [42], с соответствующей зависимостью для Луны (рис. 2.7) показывает, что мелкомасштабный рельеф на Венере в приэкваториальной зоне в среднем в 2 раза более гладкий, чем на Луне.

Для определения форм рельефа поверхности Венеры с успехом применялись наземные и космические радиолокационные методы. Впервые различие отражательных свойств в разных районах Венеры было обнаружено Гольдштейном [103] во время нижнего

соединения Венеры в 1962 г. с помощью радиолокатора обсерватории Голдстоун на длине волны 12,5 см. На поверхности планеты были выявлены 2 области с повышенным коэффициентом отражения, получившие названия α и β . Центры этих областей в системе

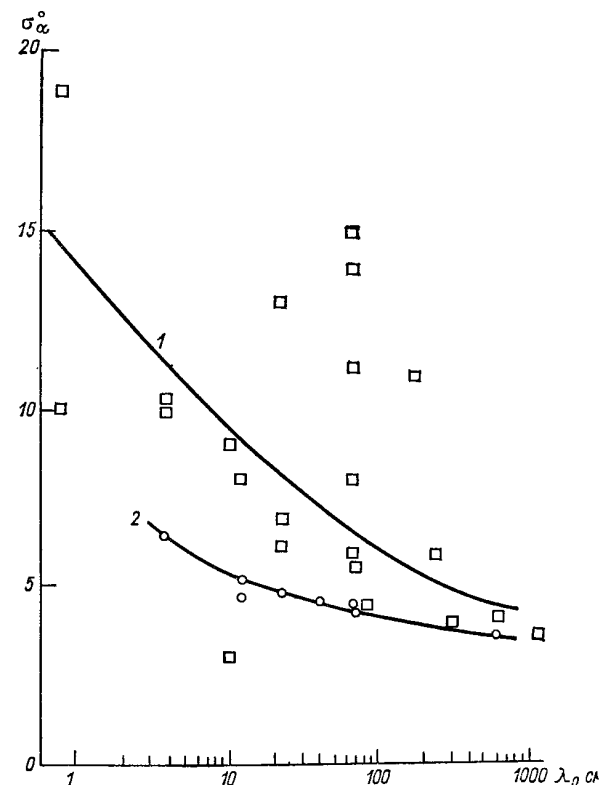


Рис. 2.7. Среднеквадратичные углы наклона поверхности Луны (1) и Венеры (2) по данным радиолокационных измерений.

МАС-70 имеют координаты $\varphi_1=29^\circ$ ю. ш., $\lambda_1=0^\circ$; $\varphi_2=23^\circ$ с. ш.; $\lambda_2=282^\circ$. Меридиан, проходящий через центр области α , по решению Международного астрономического союза в 1970 г. был выбран в качестве нулевого.

При последующих измерениях Гольдштейна [104] на этом же радиолокаторе в 1964 г. были обнаружены новые области повышенного отражения.

Первая радиолокационная карта поверхности Венеры была получена Рамсеем и др. [141] с помощью голдстоунского радиоло-

катора в 1969 г. на $\lambda_0=12,5$ см. Она имела разрешение по поверхности 80×80 км и охватывала область широт $\varphi=45^\circ$ ю. ш. ... 35° с. ш. и долгот $\lambda=225 \dots 360 \dots 40^\circ$. Анализ этой карты показал, что в масштабе примерно 100 км поверхность планеты по характеристикам отражения весьма пестрая. Отношение мощностей отраженного сигнала от наиболее «радиоярких» и наименее «радиоярких» областей составляет 20:1, что значительно больше, чем на Луне. В масштабе примерно 1000 км на поверхности имеются как сильно-, так и слабоотражающие образования. Два слабоотражающих образования с линейными размерами около 300 км были обнаружены западнее области α (координаты их центров: $\varphi_1=29^\circ$ ю. ш., $\lambda_1=351^\circ$; $\varphi_2=18^\circ$ ю. ш., $\lambda_2=350^\circ$). Маленькая очень яркая область с линейными размерами около 200 км имеет координаты центра $\varphi_3=19^\circ$ ю. ш., $\lambda_3=300^\circ$. Две слабоотражающие области имели в центре участки с большим коэффициентом отражения (координаты центров $\varphi_4=25^\circ$ ю. ш., $\lambda_4=335^\circ$; $\varphi_5=19^\circ$ с. ш., $\lambda_5=322^\circ$). На Луне подобная структура отражения свойственна ударным кратерам с центральными горками. Таким образом, уже первая радиолокационная карта Венеры показала разнообразие форм рельефа на планете и различие электромагнитных характеристик грунта в разных районах планеты. Повторение измерений с помощью этого же радиолокатора во время нижнего соединения Венеры осенью 1970 г. позволило выделить на поверхности планеты еще одну радиояркую область δ , линейные размеры которой, как и размеры областей α и β , превышают 1000 км [106].

Радиолокационное картографирование Венеры выполнялось и в других обсерваториях. Так, в обсерватории Хайстек в 1969 и 1972 гг. [137—139] были получены радиолокационные карты на длине волны $\lambda_0=3,8$ см с разрешением 100×200 км. На поверхности Венеры (см. рис. 1.1) были обнаружены два круглых слабоотражающих образования с линейными размерами 1500—1700 км; координаты центров: $\varphi_1=28^\circ$ ю. ш., $\lambda_1=335^\circ$, $\varphi_2=14^\circ$ ю. ш., $\lambda_2=312^\circ$.

Картографирование поверхности Венеры [85] на длине волны $\lambda_0=70$ см было выполнено в обсерватории Аресибо в 1969 г. с линейным разрешением 300×300 км. На карте выделяются два типа структур неправильной формы, центры которых имеют координаты $\varphi_1=27^\circ$ с. ш., $\lambda_1=330^\circ$; $\varphi_2=20^\circ$ с. ш., $\lambda_2=213^\circ$, и круглой формы с координатами центров $\varphi_3=30^\circ$ с. ш., $\lambda_3=320^\circ$; $\varphi_4=30^\circ$ ю. ш., $\lambda_4=337^\circ$. Структуры круглой формы имеют линейные размеры около 1000 км.

Совершенствование радиолокационной техники позволило поднять потенциал наземных планетных радиолокаторов и увеличить разрешающую способность при построении радиолокационных карт Венеры. Так, радиолокационное картографирование Венеры, проведенное Гольдштейном и др. [108], Юргенсом и др. [118] в 1972—1975 гг. и 1977 г. в Голдстоуне на длинах волн 12,5 и 12,9 см, позволило обнаружить кратеры. Наибольший кратер имеет диаметр вала 160 км (его координаты $\varphi=22^\circ$ ю. ш., $\lambda=324^\circ$),

но глубина этого кратера сравнительно невелика — всего 500 м. Другой кратер диаметром около 80 км имел такую же глубину, и на его склоне находился меньший кратер диаметром около 30 км.

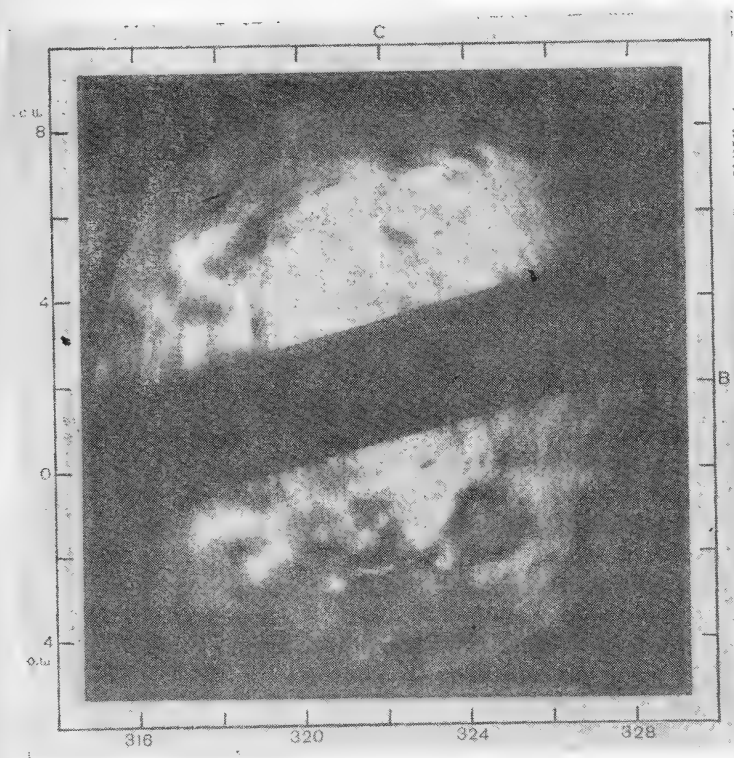


Рис. 2.8. Радиолокационная карта локального района, полученная при наземных радиолокационных измерениях на $\lambda_0=12,5$ см.

Следует сказать, что предельное линейное разрешение в этих экспериментах составило 10 км, что позволило обнаруживать кратеры диаметром 30 км и более. Таких кратеров было выявлено более десятка. В ходе этих радиолокационных измерений на поверхности планеты была выявлена большая каналообразная структура шириной около 120 км, глубиной 1,5 км и длиной 1500 км. Она пересекает экватор в области долгот 240—250°. Подобный разлом длиной 860 км был обнаружен также вблизи экватора в области долгот 350—360°. Глубина этого разлома не была установлена.

Радиолокационное изображение участка поверхности Венеры диаметром 1500 км показан на рис. 2.8. Линейное разрешение

в этих наблюдениях было доведено до 10—15 км. Кратеры на полученных радиолокационных изображениях 34 участков поверхности планеты имеют размеры от 35 км (предел разрешения) до 160 км. С помощью этого же радиолокатора осуществлялось и измерение перепада высот в этих же локальных районах. Измерения проводились с разрешением по высоте 500 м при линейном разрешении 15 км. При таком разрешении перепад высот в исследованных приэкваториальных районах не превысил 1 км. В одном из районов были обнаружены три горы высотой от 1 до 2 км и протяженностью 30—60 км. Средний угол наклона этих гор — не более $2,5\text{--}3,5^\circ$. Обнаружена система почти параллельных горных хребтов максимальной высотой 500—1000 м. Хребты начинаются на долготе $\lambda=304^\circ$, имеют юго-восточное направление и делают поворот на долготе $\lambda=311^\circ$. Длина хребтов около 800 км.

В ходе этих радиолокационных наблюдений были выявлены области, где отсутствуют перепады высот, но наблюдаются сильные вариации интенсивности отраженного сигнала. Эти вариации связаны либо с изменением плотности и диэлектрической проницаемости грунта, либо с вариациями среднеквадратичных углов наклона поверхности. Перестройка радиолокатора обсерватории Аресибо с длины волны $\lambda_0=70$ см на длину волны $\lambda_0=12,6$ см позволила включить его в программу наземных наблюдений Венеры с 1975 г. С помощью этого инструмента была получена радиолокационная карта района Гор Максвелла с линейным разрешением 22 км [107, 108]. На карте хорошо виден огромный бассейн (1500 км в направлении север—юг и 1000 км — в направлении запад—восток), ограниченный с южной стороны ярким валом. Поверхность бассейна, по всей видимости, сравнительно гладкая, так как обладает при большом угле наблюдения ($\theta > 50^\circ$) малым обратным рассеянием. В центре этого бассейна имеются две радиояркие области, которые отражают примерно в 10 раз сильнее, чем поверхность бассейна (линейные размеры около 200 км). Координаты центра бассейна $\varphi=67^\circ$ с. ш., $\lambda=328^\circ$. Яркий вал с южной стороны рассеивает в обратном направлении примерно в 10 раз больше энергии, чем поверхность бассейна. Было отмечено, что самая радиояркая область — Горы Максвелла — рассеивает в обратном направлении с единицы площади примерно в 25 раз больше, чем дно бассейна.

Более детальная радиолокационная карта Гор Максвелла показала, что обратное рассеяние радиоволн наиболее сильно в южной и восточной частях этой области (рис. 2.9). Центральная часть характеризуется значительными локальными вариациями отраженного сигнала с линейными размерами неоднородностей около 200 км. Общее повышенное отражение радиоволн этим районом со сложной пространственной структурой вызвано, по мнению авторов эксперимента, как повышенной шероховатостью всего района в масштабе длины волны, так и возможным желобчатым строением поверхности с расстоянием между впадинами около 10 км, создающими серию наклонов поверхности на базе примерно

100 км, при которых образуется много локальных площадок, нормальных к направлению облучения радиолокатора ($\theta \geq 50^\circ$).

На полученной радиолокационной карте обнаружена радиояркая протяженная деталь шириной около 100 км, расположенная перпендикулярно Горам Максвелла, которая должна быть областью с повышенной шероховатостью поверхности. При более

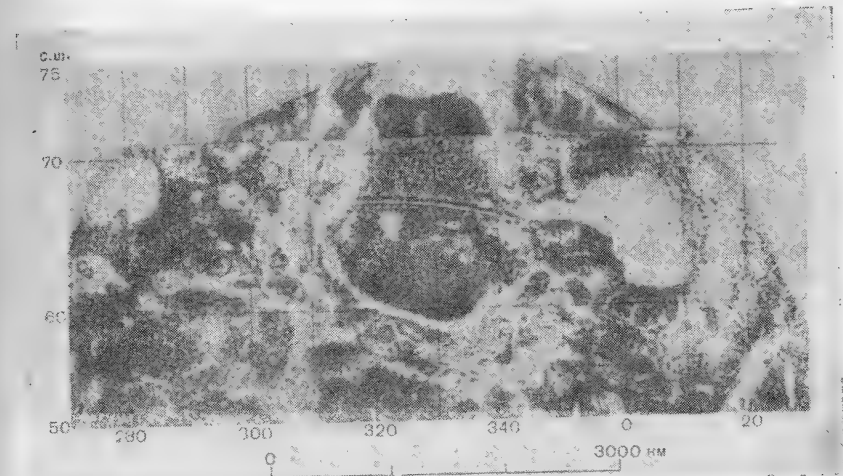


Рис. 2.9. Радиолокационное изображение района Гор Максвелла.

ранних измерениях поляризации отраженного сигнала в Аресибо на длине волны $\lambda_0=70$ см также была выявлена высокая степень шероховатости поверхности в этой области.

В обсерватории Аресибо радиолокационное картографирование Венеры было продолжено Кемпбеллом и Барнсом [87] в течение 1977 г. на длине волны $\lambda_0=12,6$ см. В ходе наблюдений обнаружено большое число сравнительно ровных круглых участков с линейными размерами от нескольких десятков до 1000 км и более, а также отдельные изолированные пики и большое число фигур неправильной формы с высокой степенью шероховатости. Так как измерения велись для больших значений углов наблюдения, то на радиолокационных картах светлым областям должны соответствовать поверхности с высокой степенью шероховатости, а темным — относительно ровные области.

Измерения 1977 г. охватили главным образом область низких широт, для которых было достигнуто линейное разрешение при радиолокационном картографировании 5 км. Измерения 1975 и 1977 гг. позволили получить синтезированную радиолокационную карту для области, занимающей около 25 % поверхности Венеры и ограниченной координатами: $\varphi=50^\circ$ ю. ш. ... 75° с. ш., $\lambda=270^\circ$...

360... 30°, с линейным разрешением от 5 до 20 км в разных районах.

Авторами эксперимента [87] рассмотрены радиолокационные карты трех локальных районов: α , β и приэкваториального района с координатами $\varphi=0... 11^\circ$, $\lambda=349... 360... 1^\circ$, а также рассмотрена синтезированная радиолокационная карта всей исследованной области. Наблюдения области α в 1977 г. с линейным разрешением 5 км (в 1975 г. эта область наблюдалась с линейным разрешением 10 км) показали, что к югу от нее находится ударный кратер диаметром 280 км с центральной горкой. Дно кратера дает слабый отраженный сигнал, а центральная горка является радиояркой площадкой. К востоку от области α обнаружена группа из 16 небольших кратеров с яркими центральными точками, что свидетельствует об их ударном происхождении. К западу от области находятся две темные фигуры диаметром 800 км с яркими центральными точками. Радиолокационное картографирование района α с высоким разрешением показало, что он весьма неоднороден. Северо-западная часть области, дающая слабый отраженный сигнал, содержит на радиолокационном изображении большое число линейных структур протяженностью в несколько сотен километров, разделенных промежутком около 20 км, которые были интерпретированы как желобчатые структуры.

Детальное радиолокационное картографирование области β в 1977 г. с линейным разрешением 5 км (рис. 2.10) показало, что примерно на 1000 км южнее этой области находится узкая шероховатая и поэтому сильно отражающая фигура, протянувшаяся более чем на 500 км в длину. Эта радиояркая деталь интерпретируется как рифтовая система, подобная долине Маринер на Марсе. Эта рифтовая (или желобчатая) система не связана с большим каньоном, обнаруженным в экваториальном районе Гольдштейном и др. [107] при наблюдениях с помощью голдстоунского радиолокатора 23.12.1973 г. ($\varphi=\pm 5^\circ$, $\lambda=282... 286^\circ$).

Область вблизи места посадки автоматической станции «Венера-10» характеризуется сильной изменчивостью интенсивности отраженного сигнала от района к району. Очень интересным оказался район поверхности, имеющий координаты $\varphi=0... 11^\circ$ с. ш., $\lambda=349... 360... 1^\circ$. В этом районе обнаружены два параллельных желоба криволинейной формы разной яркости. Их длина более 1000 км, ширина около 20 км. Интенсивность отражения сигнала от южного желоба может свидетельствовать о его наклоне, равном примерно 6° . При ширине желоба около 20 км его глубина составляет около 2 км.

Отсутствие синхронных с радиолокационным картографированием измерений высот тех же участков поверхности при наблюдении Венеры из обсерватории Аресибо значительно уменьшило ценность этих измерений по сравнению с наблюдениями с помощью Голдстоунского радиолокатора. Однако и наблюдения в обсерватории Аресибо показали, что в формировании поверх-

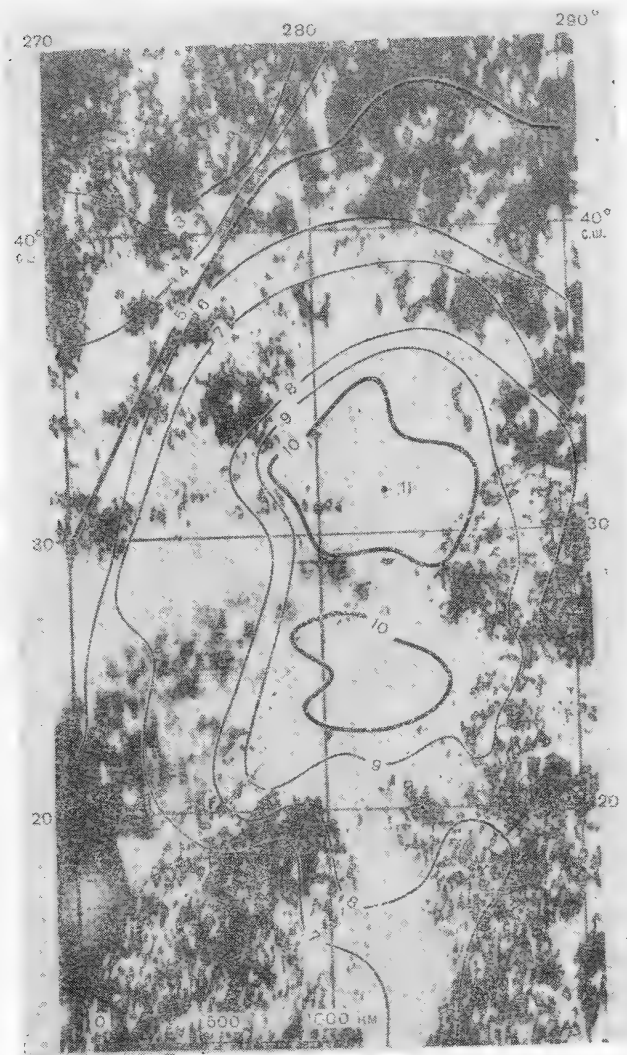


Рис. 2.10. Гипсометрическая карта области Бета, совмещенная с радиолокационным изображением, полученным при наземной радиолокации планеты.

ности Венеры принимали участие процессы как тектонического, так и ударного (экзогенного) происхождения.

На рис. 2.11 показано распределение венерианских кратеров по размерам — результаты радиолокационного картографирования

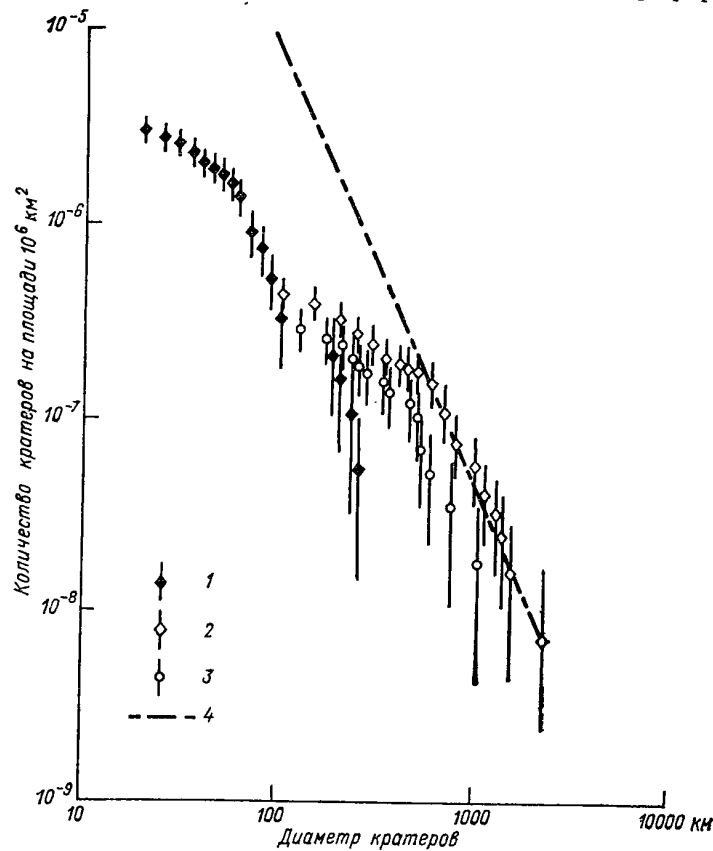


Рис. 2.11. Закон распределения венерианских кратеров по размерам (по данным радиолокационных измерений).

1 — Голдстоун ($\lambda_0=12,5$ см), 2 — Аресибо ($\lambda_0=12,6$ см), 3 — «Пионер-Венера» ($\lambda_0=17$ см), 4 — кратеры на Луне [112].

Венеры в обсерваториях Аресибо и Голдстоун, а также данные бортового радиолокатора ИСВ «Пионер-Венера-1» [127]. Как видно из рисунка, количество кратеров малых размеров (диаметром несколько километров) на Венере меньше, чем на Луне. Это не связано с наличием атмосферы у Венеры. Атмосфера Венеры задерживает только метеорные тела малого размера, которые способны создать кратеры диаметром менее 1 км.

Полученная в обсерватории Аресибо Кемпбеллом и Барнсом [87] в ходе наблюдений 1975—1977 гг. радиолокационная карта

была сопоставлена с топографической картой Венеры, построенной по данным радиовысотометрических измерений, проведенных с помощью искусственного спутника «Пионер-Венера-1». На указанной радиолокационной карте Земли Иштар в области $\varphi > 50^\circ$ с. ш. выделяется огромная слабо отражающая область Плато Лакшми, линейные размеры которого равны примерно 1200 км (координаты центра $\varphi = 67^\circ$ с. ш., $\lambda = 330^\circ$). Малый коэффициент отражения характеризует относительно гладкую поверхность этой области. В южной части Плато Лакшми находится яркая кайма шириной около 500 км. Возрастание радиолокационного контраста каймы, по мнению авторов эксперимента, связано главным образом с повышенной шероховатостью поверхности. К востоку от Плато Лакшми наблюдается очень сильно отражающая область Гор Максвелла. Мощность сигналов, отраженных от этой области, в 50 раз превышает мощность сигналов, отраженных от окрестностей той же области. Кроме того, отраженный от района Гор Максвелла сигнал сильно деполяризован. Эти два факта свидетельствуют о сильной шероховатости поверхности этого района как в сантиметровом масштабе, так и в дециметровом и метровом масштабах. Таким образом, Земля Иштар в радиолокационном плане весьма пестра. Она состоит из возвышенного и относительно гладкого Плато Лакшми и весьма шероховатого района Гор Максвелла, который обладает самым высоким на Венере значением удельной эффективной площади рассеяния. Этот район экстремален также и по степени шероховатости. Данный факт был ранее отмечен при радиолокационных наблюдениях рассматриваемой области с Земли, которые показали, что отраженный от района Гор Максвелла сигнал на $\lambda_0 = 70$ см почти полностью деполяризован.

Радиолокационное картографирование района Гор Максвелла на $\lambda_0 = 12,6$ см показало, что отражение от разных участков этого района неодинаково. В восточной части района обнаружена низкоконтрастная слабо отражающая деталь круглой формы диаметром около 100 км. Она расположена примерно на 3 км ниже главного хребта Гор Максвелла, который примерно на 7 км возвышается над окружающим эти горы плато. В этом же районе имеется еще несколько слабо отражающих деталей круглой формы диаметром около 40 км.

Детальное картографирование области β показало, что радиолокационная структура щитовых вулканов Тея ($\varphi = 23^\circ$ с. ш., $\lambda = 281^\circ$) и Рея ($\varphi = 33^\circ$ с. ш., $\lambda = 283^\circ$), на 4 км возвышающихся над окружающей местностью, различна. Так, область Рея имеет относительно сложную структуру с двумя отдельными сильно отражающими районами. Область Тея обладает более простой структурой с одним радиоярким центром, рядом с которым располагается слабо отражающая деталь почти круглой формы. Радиолокационное изображение района Тея вытянуто с юго-запада на

северо-восток. Среди других интересных деталей находится радио-яркая структура, пересекающая экватор в направлении с юга на север на долготе $\lambda = 287^\circ$. Эта радиояркая структура является продолжением ранее обнаруженной во время локальных наблюдений в Голдстоуне гигантской впадины длиной около 1200 км, стенки которой покрыты сильно раздробленным материалом. Вторая радиояркая структура полукруглой формы ($\varphi = 5^\circ$ с. ш., $\lambda = 254^\circ$) объединяется с подобной структурой, также обнаруженной ранее с помощью голдстоунского радиолокатора. Эти две структуры, видимо, являются валом бассейна диаметром около 1000 км. Северная часть этого вала, по оценкам Кемпбелла, имеет высоту до 2 км.

Детальное картографирование Венеры в обсерватории Аресибо показало, что круглые слабо отражающие фигуры по своим свойствам можно разделить на два класса. К первому классу принадлежат фигуры диаметром от 300 до 1300 км. По аналогии с лунными радиолокационными изображениями они могут быть отнесены к бассейнам, которые на Луне залиты лавой и имеют относительно гладкую поверхность. Второй класс фигур диаметром менее 300 км дает слабое отражение радиоволн, но окружающая эти фигуры поверхность обладает большой шероховатостью, которая создает высококонтрастное радиолокационное изображение. Эти фигуры могут быть ударными кратерами, аналогичными обнаруженным на Луне, однако отсутствие информации о высотных разрезах этих образований не позволяет интерпретировать их таким образом. По мнению авторов эксперимента, они с одинаковым успехом могут быть вулканическими кальдерами или какими-либо другими формами вулканического или тектонического происхождения. Некоторые такие кратероподобные структуры имеют в центре яркие точки, которые могут быть центральными горками.

Всего на радиолокационной карте, полученной в обсерватории Аресибо, обнаружено 12 круглых образований диаметром от 230 до 1260 км, отнесенных к первому классу фигур, и 33 — отнесенных ко второму классу. Характерной особенностью круглых фигур второго класса является отсутствие влияния любых изменений угла наклона на интенсивность отраженного сигнала для тех частей склона кратеров, которые нормальны к направлению облучения. Это свидетельствует о том, что венерианские кратеры неглубокие и не имеют валов, характерных для лунных кратеров. Вариации радиолокационного контраста разных частей венерианских кратеров обусловлены разной степенью шероховатости поверхности, а не изменением угла наклона. Из 33 кратеров, отнесенных ко 2 классу, 12 кратеров имеют в центре радиояркие фигуры. Ширина каймы, создающей интенсивное обратное рассеяние радиоволн, составляет от 20 до 120 км у разных кратеров, причем отношение ширины каймы к диаметру темного изображения (диаметру кратеров) у рассмотренной группы колеблется в очень широких пределах — от 0,18 до 3,35 — и составляет в среднем 0,97.

Проведенное Мазурским и др. [127] сравнение кривой распре-

деления кратеров по размерам с аналогичными кривыми для Луны и Марса показало, что количество кратеров на единицу площади поверхности на Венере больше, чем на Марсе в области Тарсис и на Луне. Обнаруженные в результате радиолокационного картографирования кратеры, за исключением кратеров Земли Иштар и области β , почти равномерно распределены по поверхности в северной части исследованной области ($\varphi = 0 \dots 20^\circ$ с. ш., $\lambda = 270 \dots 360 \dots 30^\circ$). В южной части исследованной области ($\varphi = 0 \dots 60^\circ$ ю. ш., $\lambda = 270 \dots 360 \dots 30^\circ$) наблюдается повышенная плотность кратеров в области $\varphi = 20 \dots 40^\circ$ ю. ш.

Радиолокационное картографирование с линейным разрешением 5 км и более показало, что на поверхности Венеры наблюдается большое количество малых кратеров диаметром 20—30 км (20 км — минимально различимый диаметр). Рассчитанное Мазурским и др. [127] распределение венерианских кратеров по размерам по данным наземных радиолокационных наблюдений с наибольшим линейным разрешением по поверхности (в обсерваториях Аресибо и Голдстоун) показало, что кратеры малого диаметра (< 100 км) на Венере встречаются реже, чем на Луне (см. рис. 2.11). Изгиб кривой распределения кратеров по размерам для кратеров диаметром менее 100 км не может быть объяснен влиянием атмосферы, так как минимально различимые кратеры образуются посредством удара в условиях Венеры телами, которые свободно пролетают через всю толщу современной венерианской атмосферы.

Используя методику Хартмана и Вуда [112], Мазурский и др. [127] определили возраст кратерообразования на Венере (при условии, что все кратеры ударного происхождения). Он оказался равным 600 млн лет (нижний предел) по сравнению с 800 млн лет для Марса (область Тарсис) и 2,8—3,9 млрд лет для Луны. Это свидетельствует об относительной молодости венерианской поверхности.

Недостаточно высокое линейное разрешение при проведении радиолокационного картографирования Венеры не позволило определить природу образований большинства обнаруженных кратеров. Только небольшое количество кратеров с большей или меньшей степенью достоверности отнесено к кратерам ударного (экзогенного) происхождения. Два образования (горы Тея и Рея) отнесены к классу щитовых вулканов.

Для понимания процессов формирования кратерированной поверхности необходимы радиолокационные измерения как отражательной способности, так и рельефа с линейным разрешением 1 км и менее. Современная техника наземной радиолокации пока такое разрешение обеспечить не может. Первая попытка радиолокационного картографирования поверхности Венеры с одновременным измерением рельефа с борта искусственного спутника «Пионер—Венера-1» оказалась весьма успешной для определения фигуры

планеты, глобальных топографических измерений и глобального определения локальных характеристик обратного рассеяния радиоволн поверхностью Венеры. Однако эти пионерские измерения были выполнены с недостаточным для целей морфологии разрешением, хотя и позволили лучше понять тектонику планеты.

Запуск на орбиту вокруг Венеры искусственных спутников «Пионер—Венера-1», «Венера-15» и «Венера-16», оснащенных радиовысотомерами и радиолокаторами бокового обзора, позволил получить детальные гипсометрические карты большей части поверхности планеты, а также карты отражательной способности ее поверхности.

Во время движения искусственного спутника «Пионер—Венера-1» вокруг Венеры было получено радиолокационное изображение поверхности планеты в районе с координатами $\varphi=0\ldots 40^\circ$ с. ш., $\lambda=20\ldots 310^\circ$. Изображение было получено при работе бортового радиолокатора в режиме бокового обзора, когда антенна была отклонена от направления надира на 45° . Измерения проводились на высотах полета ИСВ менее 500 км с помощью антенны, ширина диаграммы направленности которой составляла 30° . Радиолокационное изображение имело 64 элемента разложения по дальности с линейным разрешением 40 км на элемент. Это изображение является результатом синтеза одиночных радиолокационных изображений, полученных за 35 оборотов спутника «Пионер—Венера-1» вокруг планеты, с направлений западнее и восточнее следа подспутниковой точки в районе перицентра орбит. Анализ построенного радиолокационного изображения показал, что на поверхности имеется ряд круговых структур, обладающих яркими центральными точками. Эти структуры (например, с координатами $\varphi_1=20^\circ$ с. ш., $\lambda_1=331^\circ$; $\varphi_2=15^\circ$ с. ш., $\lambda_2=226^\circ$) принадлежат ударным кратерам с центральными горками. Кратеры имеют диаметр 400—800 км и очень небольшую по радиовысотометрическим данным глубину (всего 500—700 м). Малая глубина кратеров, очевидно, является следствием высокой подвижности венерианской коры.

Результаты радиовысотометрических измерений, выполненных с помощью радиовысотомера искусственного спутника «Пионер—Венера-1», позволили построить гипсометрическую карту планеты, которая показала, что на поверхности Венеры имеется три крупномасштабных возвышенных образования: Северное плато, Приэкваториальное плато и цепочка горных образований, подобная системе Гавайских островов на Земле. Крупномасштабная гипсометрическая карта области Бета, построенная по данным радиовысотометрических измерений Мазурским и др. [127], показана на рис. 2.10. На этой карте горизонталы отстоят друг от друга на 1 км.

Уже первые измерения высотных профилей поверхности, выполненные на искусственном спутнике «Пионер—Венера-1», позволили обнаружить следы тектонической активности на планете. Была выявлена рифтовая долина глубиной до 7 км. Построенная

по данным радиовысотометрических измерений гипсометрическая карта с линейным разрешением 30 км, показала, что в области с центром $\varphi=20^\circ$ ю. ш., $\lambda=165^\circ$ и линейными размерами 1000×1500 км имеется система холмов и впадин, ориентированных с востока на запад. Максимальный угол наклона этих образований на дистанции 100 км составил 5° , а боковые склоны холмов имеют углы наклона около $2,5^\circ$. Область Бета имеет рифтовое происхождение; она образовалась в результате крупномасштабного сдвига коры. Ученые пришли к выводу, что подобная картина не может быть следствием эрозионных процессов. Для этого района были получены одновременно высотные профили, определены отражающие свойства грунта и изучена степень шероховатости поверхности в масштабе нескольких десятков метров.

Проведенный анализ этого материала показал, что прослеживается довольно четкая корреляция между крупномасштабным рельефом и мелкомасштабными неоднородностями поверхности. Районы со сложным рельефом обладают также и большей степенью неровности в масштабе единиц и десятков метров. Более ровные районы в масштабе нескольких десятков километров обладают более постоянным коэффициентом отражения радиоволн сантиметрового и дециметрового диапазонов.

Последующие измерения высотных профилей поверхности, выполненные для районов с аномальными характеристиками отражения, которые по результатам наземной радиолокации получили названия: Горы Максвелла, области Бета, Гаусс и Герц, — подтвердили высокую степень тектонической активности венерианской коры. Для этих районов при наблюдении с Земли Кемпбеллом были получены в обсерватории Аресибо радиолокационные изображения на длине волны 12,5 см.

Область, включающая Горы Максвелла ($\varphi=55\ldots 75^\circ$ с. ш., $\lambda=310\ldots 10^\circ$), оказалась огромным тектоническим плато, размером 3000×1500 км, поднятым на 5—10 км относительно окружающей поверхности. Это плато, по размерам соответствующее Австралии, имеет три горных хребта, два из которых расположены в сильно отражающих, а один в слабо отражающем радиоволны районе. Светлый на радиолокационном изображении район Гор Максвелла (координаты центра $\varphi=65^\circ$, $\lambda=5^\circ$) оказался самым большим на планете хребтом, расположенным в почти меридиональном направлении. Вершина этого хребта — самая высокая из исследованных на Венере — отстоит на 6062,4 км от центра фигуры Венеры, т. е. имеет высоту относительно среднего уровня поверхности планеты (6051,6 км), равную 11 км. Протяженность хребта около 1000 км, а ширина достигает 500 км. Сам хребет поднят на 6 км относительно окружающего его плато, возвышающегося на 5 км относительно окружающей плато низменной равнины. Высотный профиль поверхности, полученный с помощью радиовысотомера ИСВ «Венера-15», показан на рис. 2.12.

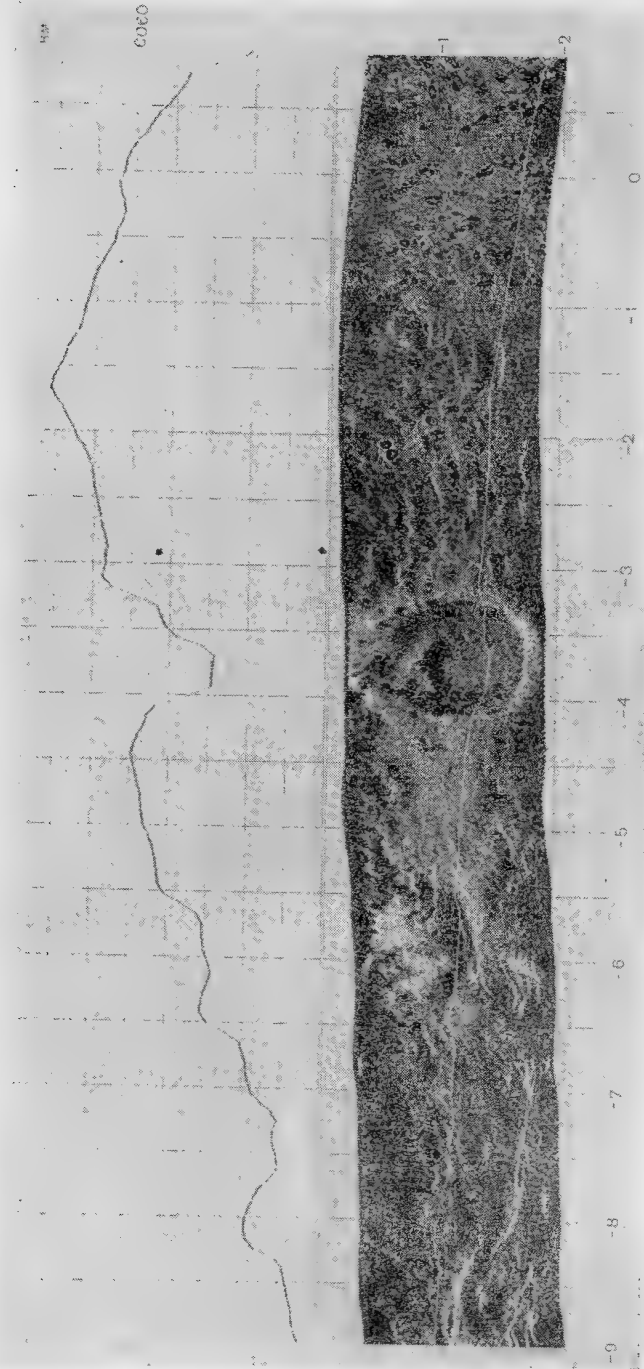


Рис. 2.12. Фрагмент радиолокационной карты Венеры в районе Гор Максвелла и профиль высот по данным измерений 17.01.1984 г., полученные с помощью ИСКВ «Венера-15, -16».

Горы Максвелла имеют размеры, в 2 раза превышающие размеры Гималайского плато. Район Гор Максвелла является топографически сложным образованием. Его широкая терраса круто обрывается к юго-западу. Большой отрог возвышается северо-восточнее главного хребта. От главного гребня в западном направлении тянется на 600 км небольшой подъем, поверхность которого дает яркое радиолокационное изображение. Западная часть района Гор Максвелла имеет темное радиолокационное изображение в виде грушеподобной чаши, кольцевая структура которой была обнаружена при анализе наземных радиолокационных изображений Венеры.

Второй из трех хребтов на 3 км возвышается над окружающим районом и вытянут вдоль его северной кромки. Этот горный хребет с помощью спутника «Пионер—Венера-1» был картирован не полностью. Самый маленький хребет возвышается над плато на 2 км и расположен в его северо-западной части с ориентацией гребня с юго-запада на северо-восток. По мнению специалистов, три огромных хребта могут иметь тектоническое или вулканическое происхождение. В любом случае должна была иметь место тектоническая деятельность, которая способствовала созданию вытянутых структур.

Весьма важная информация была получена при совместном анализе радиовысотометрической информации и радиолокационного изображения района Бета (см. рис. 2.10). В этом районе расположены две радиолокационно яркие области Герц и Гаусс, обнаруженные еще в 70-е годы при наблюдении Венеры в обсерватории Аресибо на длине волны 70 см. Эти области оказались возвышенностями с пологими склонами высотой примерно 5 км. Одинаковая форма радиоярких областей Гаусс и Герц позволили геологам предположить, что они являются большими щитовыми вулканами базальтовой природы. По их мнению, области Гаусс и Герц образовались в результате линейных сдвиговых процессов, совмещенных с вулканической деятельностью. Однако разрешения вдоль поверхности радиовысотометрических измерений (8×30 км) и радиолокационного изображения (40×40 км) в эксперименте на ИСКВ «Пионер—Венера-1» было недостаточно, чтобы подтвердить подобный вывод. Увеличение в последующих экспериментах значения линейного разрешения на порядок позволило «разглядеть» в этом районе кольцевые структуры, свойственные вулканическим кратерам («Венера-15», «Венера-16»).

Вывод на орбиту искусственных спутников «Венера-15» и «Венера-16» с комплексом радиофизической аппаратуры на борту, включающим и радиовысотомер, позволил для северного полушария планеты провести измерения высот полета спутников над поверхностью планеты и построить гипсометрическую карту ранее неисследованной части Венеры. Эти измерения были выполнены с лучшей пространственной разрешающей способностью, чем это

было сделано на ИСВ «Пионер—Венера-1» (среднеквадратичная погрешность измерения высоты — 30 м, шаг измерения высоты — 50 км).

Установленные на борту ИСВ «Венера-15» и «Венера-16» радиолокационные станции бокового обзора позволили получить радиолокационные изображения поверхности северной полусферы Венеры с наибольшим разрешением (по сравнению со всеми проведенными экспериментами). Линейное разрешение по поверхности в направлении вдоль трассы полета ИСВ составило 1,2—1,5 км, а перпендикулярно трассе полета — 0,9—1,5 км в диапазоне высот 1000—2000 км. Радиолокационные станции работали на длине волны около 8 см и позволили получить высококачественное изображение поверхности Венеры во всей зоне, расположенной севернее 25° (площадью более 100 млн. км²).

Этот уникальный эксперимент проводился большой группой ученых под руководством академиков А. Ф. Богомолова и В. А. Котельникова. Благодаря полученным изображениям, имеющим высокое пространственное разрешение, впервые появилась возможность обсуждать не только основные черты орографии планеты, но и геологическое строение различных районов. Весьма важным моментом было высокочастотное профилирование во время радиолокационной съемки местности. Измерения высоты следовали через каждые 0,3 с и усреднялись по семи измерениям. В результате получалось значение высоты над средней поверхностью в пятне диаметром 40—50 км со среднеквадратичной погрешностью 30 м. Поскольку антенна радиовысотомера направлена в нади́р, а радиолокационное изображение получается путем бокового обзора, трассы измерения высот и съемки изображений не совпадают. Но они совмещаются через некоторое время за счет вращения планеты.

По мере получения информации со станций «Венера-15, -16» она компоновалась в фотокарты и подвергалась геолого-морфологическому анализу группой ученых под руководством В. Л. Барсукова [6]. Одним из первых изучалось геологическое строение района Гор Максвелла — самой высокой области Венеры. На фото (см. рис. 2.12) дан фрагмент снимка этого района длиной около 1000 км. Снимок получен 20.01.1984 г., а профиль высот для него снят 17.01.1984 г. Профиль показан в верхней части рис. 2.12, трасса измерения высоты дана на снимке в виде белой линии. Максимальная высота рассматриваемого горного массива составляет 11 км над средним радиусом Венеры 6051 км. В центре снимка виден огромный кратер — Патера Клеопатра — диаметром 100 км. Высокое разрешение радиолокатора позволило выявить его сложное строение. Внутри большого кратера глубиной около 4,5 км находится второй кратер меньшего диаметра, дно которого опущено еще на 1 км.

На рис. 2.13 приведена фотокарта района Гор Максвелла, синтезированная по результатам ежедневной съемки с 12 по 25 января 1984 г. космическим аппаратом «Венера-16». Фотокарта вы-

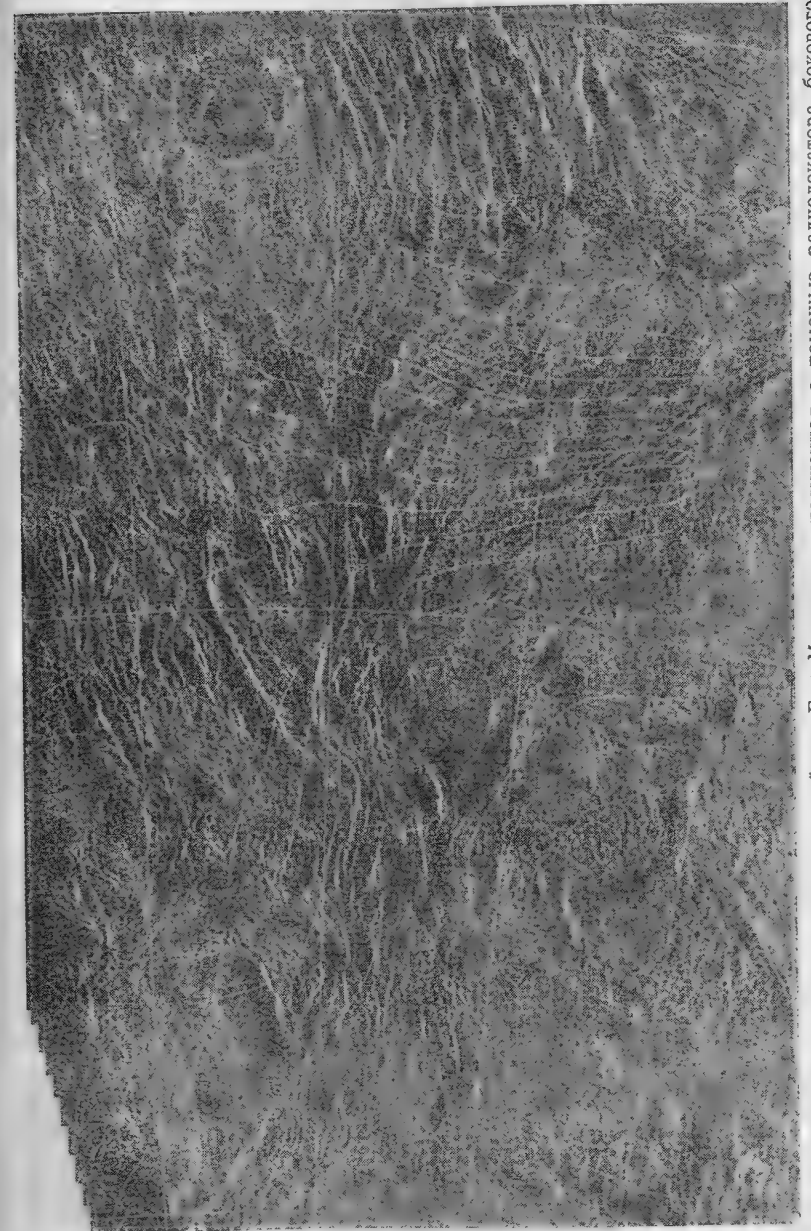


Рис. 2.13. Радиолокационная карта района Гор Максвелла, полученная с помощью радиолокатора бокового обзора ИСВ «Венера-16».

полнена в проекции Ламберта—Гаусса, стандартные параллели 58,3° и 72,4°. Линии равных высот следуют с шагом 0,5 км относительно радиуса планеты 6051 км. Как видно, Горы Максвелла и местность, прилегающая к ним, образованы нагромождением асимметричных (восточный край круче западного) хребтов с направлением, близким к меридиональному. Геолого-морфологический анализ этой местности, в том числе с использованием стереонаблюдений, привел группу В. Л. Барсукова к однозначному выводу о формировании наблюдаемых структур в результате горизонтальных тектонических деформаций в обстановке сжатия в направлении, близком к широтному.

В. Л. Барсуковым и др. [8] в результате анализа радиолокационных изображений поверхности планеты, полученных с линейным разрешением 1—2 км, была обнаружена структура поверхности, ранее не встречавшаяся на других планетах. Эта структура, занявшая большую часть Земли Иштар и всю область Теллуры, была названа условным термином «паркет». Были выделены два основных типа такой структуры: область с диагонально-хаотическим рисунком площадью 1000×3000 км к востоку от Гор Максвелла и область с ортогональными хребтами и долинами площадью 1000×1500 км к юго-востоку от Гор Максвелла.

Основные рельефообразующие элементы первой области — короткие (несколько десятков километров) хребты с асимметричными склонами, образованные наклонно залегающими мощными пластами горных пород. Эти хребты разделены продольными и поперечными долинами, образующими диагональные и хаотические системы, напоминающие торосы. По мнению Барсукова и др. [9], поверхность такого типа образовалась за счет горизонтального движения сжимаемых толщ слоистого строения, что создало нагромождение тектонических чешуй.

Вторая область образовалась за счет горизонтального движения пород в условиях растяжения и по структуре напоминает некоторые зоны растяжения на Земле. Протяженные параллельные долины этой области (длиной в несколько сотен километров) имеют между собой короткие поперечные расселины, чередующиеся с хребтами.

На радиолокационных фотографиях выявлены зоны линейных хребтов и долин (обрамление Плато Лакшми, протяженные пояса на вулканических равнинах), возникшие при горизонтальных перемещениях в условиях сжатия, т. е. имеющие тектоническую природу.

Равнинные территории планеты обнаружены двух видов. Гладкие равнины сходны по морфологии с базальтовыми морскими равнинами на Луне, Марсе и Меркурии. Эти равнины не имеют четко выраженной структуры и сформированы базальтовыми излияниями. На их поверхности присутствуют небольшие куполообразные возвышенности, часть которых имеет кратеры. Другой тип равнин — холмистые равнины, расположенные западнее и восточнее Земли Иштар. На поверхности этих равнин выделяются крупные

кольцевые структуры; некоторые структуры частично залиты базальтовым расплавом, что свидетельствует о сравнительно небольшой мощности базальтовой лавы в этом районе.

На равнинах выявлены очень крупные кольцевые структуры — овоиды, имеющие диаметр от 150 до 600 км. Эти структуры очерчены системой концентрически-параллельных кольцевых или дугообразных гряд. Эти гряды возникли при оползании и сжатии горных пород на склоне растущего купола. Подобных структур, имеющих тектонико-магматическую природу, не обнаружено на других телах Солнечной системы.

Благодаря высокому разрешению на радиолокационных фотографиях были обнаружены многочисленные ударные кратеры диаметром от 10 до 140 км; некоторые кратеры имеют центральные горки. По морфологии они похожи на ударные кратеры подобных размеров на других планетах. По плотности кратерообразования возраст ударных кратеров составляет 0,5—1 млрд лет. Более старых кратеров на изученной территории не обнаружено.

Проведенный Барсуковым и др. [9] геолого-морфологический анализ радиолокационных изображений северного полушария Венеры позволил выделить и закартировать четыре основных типа образований: вулканические, вулкано-тектонические, тектонические и ударные. Вулканические равнины (гладкие и холмистые) занимают большую часть изученной территории. Вулкано-тектоническими образованиями являются крупные куполообразные возвышенности Бета и Белл, а также овоиды, расположенные на вулканических равнинах. Тектонические образования имеют шесть разновидностей и представлены зонами разрывных складчатых структур. Наибольшее распространение среди них имеют зоны «паркета» (площадные деформации), наименьшее распространение — складчатые пояса (линейные деформации). По оценкам советских геоморфологов, площадные деформации предшествовали линейным.

Обнаружение ударных кратеров на Венере явилось подтверждением того, что плотная атмосфера планеты не является препятствием для крупных метеоритов. Ударные кратеры обнаружены в разных провинциях: на гладких и холмистых равнинах, высокогорных вулканических плато. Ударные кратеры, по данным А. Т. Базилевского и др. [5], имеют разные морфологические структуры и делятся на четыре класса: 1) свежие кратеры с четкими контурами, хорошо различимыми деталями внутренней структуры и хорошо выраженной зоной выбросов; 2) кратеры с нечетко выраженной зоной выбросов, но с хорошо различимыми деталями внутреннего строения; 3) кратеры с уменьшенной контрастностью деталей строения и без зоны выбросов; 4) сильно разрушенные кратеры, иногда лишь предположительно ударные.

На площади 70 млн км² был учтен 121 кратер диаметром от 10 до 138 км. Подавляющее большинство кратеров были отнесены

к 1-му и 2-му классам (30 и 40 % соответственно). Выполненный Базилевским и др. анализ морфологических характеристик ударных кратеров [5] показал, что переход от чашеобразных кратеров к кратерам с центральной горкой должен происходить, если диаметр кратеров находится в интервале 3—5 км, а переход от кратеров с центральной горкой к кольцевым бассейнам — при диаметре 28—100 км. Однако чашеобразные кратеры на Венере могут иметь диаметр 10—22 км.

Интересной особенностью свежих ударных кратеров на Венере является высокая радиолокационная яркость зоны выбросов, что является следствием ее повышенной шероховатости в масштабе длины волны радиолокатора ($\lambda_0 = 8$ см). Проведенный анализ радиолокационных изображений северного полушария Венеры позволил советским ученым сделать вывод, что экзогенные процессы на планете по своей интенсивности подобны лунным, марсианским и меркурианским, а эндогенные процессы (особенно тектонические) резко отличаются от эндогенных процессов на названных небесных телах. Экзогенные процессы на Венере более слабые, чем на Земле, эндогенные процессы на Венере и Земле сопоставимы.

Следует отметить, что на радиолокационных изображениях ИСВ «Венера-15», «Венера-16» не обнаружено каких-либо следов водной эрозии. Анализ радиолокационных изображений поверхности Венеры подтвердил, что базальтовый вулканизм характерен для всех тел земной группы, но на Венере он более молодой (0,5—1 млрд лет), чем на Луне и Меркурии (3—4 млрд лет).

Геолого-морфологический анализ радиолокационных изображений планеты Венера, полученных с высоким разрешением, еще далеко не закончен, но он уже дал много новой уникальной информации о поверхности этой планеты. Суммируя всю полученную о рельефе поверхности Венеры информацию, следует сказать, что в настоящее время убедительно доказана весьма интенсивная тектоническая деятельность на планете, высокая подвижность ее коры, существование гигантских кратеров вулканического и ударного происхождения. Существует ли в настоящее время вулканизм на планете, по имеющейся информации сказать пока нельзя. Однако морфологическая молодость поверхности в районе посадки автоматической станции «Венера-9», высокая подвижность коры, приводящая к «замыванию» кратерных воронок, разломы и рифтовые зоны, щитовые вулканы, высокая температура поверхности являются факторами, которые делают весьма вероятным существование современного вулканизма на планете.

Для того чтобы убедиться в этом, нужно проведение одновременного радиолокационного и радиоастрономического (радиотеплового) картографирования поверхности с линейным разрешением по крайней мере в единицы километров. Большой шаг в этом направлении был сделан в результате запуска в 1983 г. двух спутников Венеры («Венера-15», «Венера-16»), имеющих на борту радиолокатор с синтезированной апертурой, радиовысотмер-профиломер и поляризационный радиометр дециметрового диапазона.

2.3. Физико-химические и физико-механические характеристики грунта

О веществе верхнего покрова Венеры наши знания до полета «Венеры-13» и «Венеры-14» были весьма скудны. Все, что мы знаем сегодня, получено с помощью наземной и космической радиолокации и радиоастрономии, а также с помощью космических аппаратов, спустившихся на поверхность Венеры.

На спускаемых аппаратах «Венера-8», «Венера-9», «Венера-10», а затем и на СА «Вега-1», «Вега-2» устанавливались 160-канальные гамма-спектрометры, которые по спектру отражения грунта в диапазоне энергий 0,3—3,0 МэВ позволили определить содержание в нем радиоактивных элементов урана, тория и изотопа калия (^{40}K). Результаты измерений показали, что в районах посадок этих станций грунт по содержанию радиоактивных элементов близок к основным породам земной коры: толеитовым базальтам, габброидам. В табл. 2.2 показаны результаты этих измерений, выполненных

Таблица 2.2
Содержание U, Th, ^{40}K в образцах Земли и Венеры

	U	Th	^{40}K
Грунт Венеры			
«Венера-8»	$(2,2 \pm 0,7) \cdot 10^{-6}$	$(6,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-6}$	$(4 \pm 1,2) \cdot 10^{-2}$
«Венера-9»	$(0,6 \pm 0,16) \cdot 10^{-6}$	$(3,65 \pm 0,42) \cdot 10^{-6}$	$(0,47 \pm 0,08) \cdot 10^{-2}$
«Венера-10»	$(0,46 \pm 0,26) \cdot 10^{-6}$	$(0,7 \pm 0,34) \cdot 10^{-6}$	$(0,3 \pm 0,16) \cdot 10^{-2}$
«Вега-1»	$(0,64 \pm 0,47) \cdot 10^{-6}$	$(1,5 \pm 1,2) \cdot 10^{-6}$	$(0,45 \pm 0,22) \cdot 10^{-2}$
«Вега-2»	$(0,68 \pm 0,38) \cdot 10^{-6}$	$(2,0 \pm 1,0) \cdot 10^{-6}$	$(0,40 \pm 0,20) \cdot 10^{-2}$
Граниты Земли	$9,04 \cdot 10^{-6}$	$21,9 \cdot 10^{-6}$	$3,24 \cdot 10^{-2}$
Базальты Земли	$0,86 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$0,76 \cdot 10^{-2}$

в Институте геохимии и аналитической химии АН СССР под руководством А. П. Виноградова и Ю. А. Суркова. В этой же таблице приведены результаты анализа грунта в районах посадки СА «Вега-1» и «Вега-2», выполненного под руководством Ю. А. Суркова.

На спускаемых аппаратах «Венера-13», «Венера-14», «Вега-1» группой Суркова был проведен детальный химический анализ грунта планеты с помощью рентгенофлуоресцентных спектрометров. В качестве источников облучения анализируемого грунта использовали изотоп свинца ^{235}Pb и изотоп железа ^{55}Fe . Возникаю-

щее при облучении грунта рентгеновское излучение регистрировалось счетчиком. Энергетический спектр этого излучения по массовым числам перекрывал диапазон элементов таблицы Менделеева от магния до железа. Радиоактивный источник ^{235}Rb наиболее эффективно возбуждал излучение легких элементов типа магния и кремния, а источник ^{55}Fe наиболее эффективно возбуждал излучение тяжелых элементов, близких по массовым числам к железу — железо, титан.

Полученные спектры рентгеновского излучения образца венерианского грунта были зарегистрированы 256-канальным спектрометром. Спектрограммы трех образцов были сопоставлены со спектрограммами 200 различных образцов земных горных пород, химический состав которых был определен в лаборатории аналитическими методами. Проведенное сопоставление измеренных и эталонных спектров позволило определить содержание основных элементов в грунте Венеры. По элементному составу было определено содержание окислов в веществе (табл. 2.3).

Таблица 2.3
Содержание (% по массе) окислов в грунте Венеры

Окисел	„Венера-13“	„Венера-14“	„Вера-2“
SO_3	$1,62 \pm 1,00$	$0,88 \pm 0,77$	$4,7 \pm 1,5$
MgO	$11,4 \pm 6,2$	$8,1 \pm 3,3$	$11 \pm 3,8$
Al_2O_3	$15,8 \pm 3,0$	$17,9 \pm 2,6$	$16 \pm 1,9$
SiO_2	$45,1 \pm 3,0$	$48,7 \pm 3,6$	$45,6 \pm 3,2$
K_2O	$4,0 \pm 0,63$	$0,2 \pm 0,07$	$0,1 \pm 0,08$
CaO	$7,1 \pm 0,96$	$10,3 \pm 1,2$	$7,3 \pm 0,7$
TiO_2	$1,59 \pm 0,45$	$1,25 \pm 0,41$	$0,2 \pm 0,1$
MnO	$0,2 \pm 0,1$	$0,16 \pm 0,08$	$0,14 \pm 0,1$
FeO	$9,3 \pm 2,2$	$8,8 \pm 1,8$	—
Fe_2O_3	—	—	$8,5 \pm 1,3$
Сумма	96	96	95

Анализ материалов, выполненный Ю. А. Сурковым и его сотрудниками, показал, что грунт в месте посадки «Венеры-13» (древняя холмистая возвышенность) относится к щелочным базальтам, «Венеры-14» (гладкая низменность, покрытая вулканическим туфом) — к толеитовым базальтам, «Веги-2» (высокогорная область северо-восточной части Земли Афродиты) — к анортит-норит-троктолитам, составляющим основу лунной материковой коры.

В результате фотометрической обработки панорам местности, полученных со станций «Венера-9, -10, -13, -14», выполненной А. С. Селивановым и др. [66, 69], были определены яркости, освещенности и контрасты элементов поверхности, а также их отра-

жательные характеристики в видимом диапазоне. При рассмотрении различных вариантов индикатрис отражения поверхности, а также зафиксированных на панорамах изменений средней яркости в широком диапазоне углов визирования было установлено, что индикатрису отражения можно считать достаточно близкой к ортотропной. Определение значений альbedo элементов поверхности для всех четырех станций дало совпадающие результаты: 0,03—0,12 (для Луны среднее значение 0,07). Такие значения альbedo характерны для темных горных пород с очень неровной поверхностью.

На спускаемом аппарате «Венера-10» была измерена плотность камня, на который опустился датчик радиационного плотнмера. Она оказалась равной $2,7\text{—}2,9 \text{ г/см}^3$, что соответствует плотности базальтов. Плотность грунта определялась также с помощью радиофизических измерений. Наземная радиолокация позволила получить информацию об отражении радиоволн в диапазоне 3—70 см. По этим данным были рассчитаны средние значения диэлектрической проницаемости и плотности грунта для экваториальной зоны планеты. Расчеты, выполненные Н. Н. Крупенио [123], показали, что верхний покров толщиной 1 м имеет диэлектрическую проницаемость около 3, что соответствует средней плотности $1,2\text{—}1,9 \text{ г/см}^3$. Радиолокационные измерения показали, что с ростом глубины происходит увеличение плотности грунта и соответственно рост диэлектрической проницаемости. Так, на глубине около 5 м плотность составляет $2,2\text{—}2,7 \text{ г/см}^3$ (рис. 2.14), т. е. верхний покров Венеры, как и верхний покров Луны, имеет слой раздробленного вещества. Толщина этого слоя для экваториальной области планеты равна примерно 2—5 м.

На автоматических станциях «Венера-13» и «Венера-14» были установлены приборы для измерения несущей способности и электропроводности грунта [26], а также датчики перегрузки [2]. Комплекс этих приборов позволил определить электропроводность и физико-механические характеристики венерианского грунта. Проведенные измерения электропроводности венерианского грунта показали, что в месте посадки СА «Венера-13» ее значение равно 89 Ом·м, а в месте посадки СА «Венера-14» — 73 Ом·м. Измеренные значения оказались на 1—2 порядка ниже значений, которые должны быть у базальтов, находящихся при температуре и давлении, соответствующих венерианским условиям.

Измеренные значения несущей способности венерианского грунта составили $2,6\text{—}10 \text{ кг/см}^2$ для рыхлого гранулированного вещества в месте посадки СА «Венера-13» и $65\text{—}250 \text{ кг/см}^2$ для монолитного выхода консолидированной породы в месте посадки СА «Венера-14».

Анализ изменений со временем перегрузок, возникших при ударе спускаемого аппарата о грунт Венеры, позволил оценить плотность и несущую способность вещества верхнего покрова Ве-

неры. В месте посадки СА «Венера-13» плотность вещества оказалась равной $1,4\text{--}1,5\text{ г/см}^3$, а несущая способность грунта — $4\text{--}5\text{ кг/см}^2$. В месте посадки СА «Венера-14» первые 10 см обладали плотностью $1,15\text{--}1,20\text{ г/см}^3$ и несущей способностью около

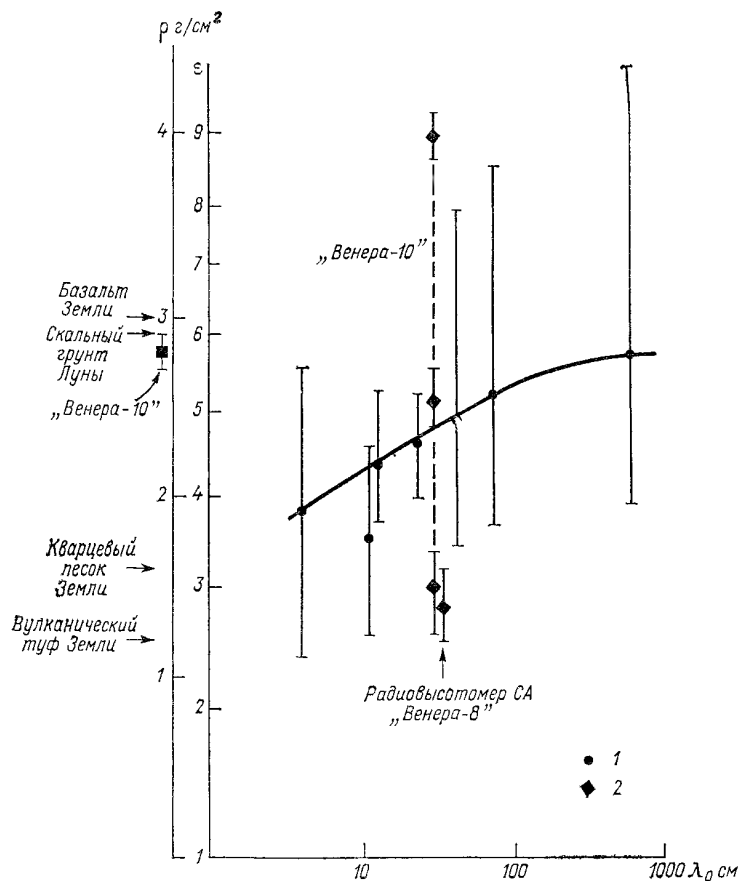


Рис. 2.14. Диэлектрическая проницаемость ϵ и плотность грунта ρ Венеры по данным радиофизических измерений.

1 — наземные измерения, 2 — измерения с космических аппаратов.

2 кг/см^2 . Ниже этого слоя находился слой с плотностью $1,4\text{--}1,5\text{ г/см}^3$ и несущей способностью $4\text{--}5\text{ кг/см}^2$. По оценке К. П. Флоренского и др. [76], пористость вещества верхнего покрова в месте посадки «Венеры-13» составляет 50 %, «Венеры-14» — 60 % в слое 10 см и 50 % глубже этого слоя. Эти значения были получены по химическому составу вещества верхнего покрова, определенному Ю. А. Сурковым и др. [72] с помощью приборов, установленных на этих же спускаемых аппаратах, ме-

тодом рентгенофлуоресцентного анализа. По химическому составу вещества верхнего покрова была сделана оценка плотности его скелета.

Радиолокационные измерения, проведенные на спускаемом аппарате «Венера-8», позволили по интенсивности отраженного сигнала на длине волны $\lambda_0 = 35\text{ см}$ для модели гладкой поверхности определить значение плотности грунта [10]. Оно оказалось равным

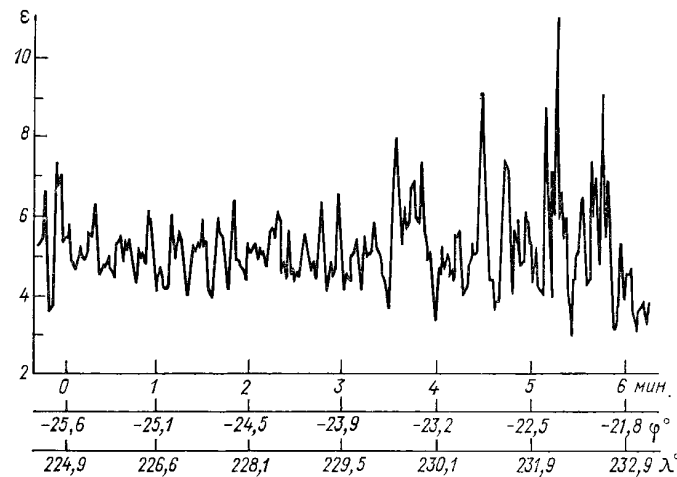


Рис. 2.15. Диэлектрическая проницаемость грунта Венеры по данным бистатистических радиолокационных измерений, проведенных на ИСВ «Венера-10».

$(1,4 \pm 0,2)\text{ г/см}^3$. Если учесть среднюю шероховатость поверхности, полученную по наземным радиолокационным наблюдениям, то расчетное значение плотности грунта в районе посадки СА «Венера-8» увеличится на 15 %, т. е. составит $1,6\text{ г/см}^3$.

Во время полета искусственных спутников «Венера-9» и «Венера-10» проводились сеансы бистатистической радиолокации на длине волны 32 см [80]. В одном из сеансов измерений по интенсивности отраженного сигнала была оценена диэлектрическая проницаемость грунта (рис. 2.15). Согласно этим данным, локальные значения эффективной диэлектрической проницаемости изменяются в диапазоне $3\text{--}9,1$ при точности определения локального значения $\pm 0,4$. Это соответствует изменению плотности грунта в слое толщиной 2—3 м от $1,5$ до 4 г/см^3 при среднем значении $2,56\text{ г/см}^3$.

Среднее для планеты значение диэлектрической проницаемости грунта было определено А. Д. Кузьминым и Б. Кларком [50] при проведении радиоинтерферометрических измерений на длине волны 10,6 см. После обработки результатов измерений получено

значение $\varepsilon = 3,6 \pm 1$, что соответствует возможному диапазону средней плотности грунта $1,2\text{--}2,3 \text{ г/см}^3$ в слое толщиной около 1 м. Полученная информация о плотности вещества верхнего покрова Венеры (см. рис. 2.14) свидетельствует о том, что грунт на этой планете более плотный, чем на Луне и Марсе, в слое одинаковой толщины.

Следует отметить, что радиофизическая информация о поверхности и грунте Венеры при наблюдении планеты с Земли может быть получена только в дециметровом и метровом диапазоне волн.

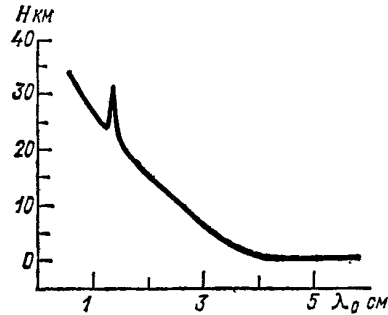


Рис. 2.16. Зависимость радиоизлучения от высоты атмосферы (для атмосферы с 0,5 %-ным содержанием водяного пара).

Сантиметровые и миллиметровые волны существенно ослабляются атмосферой. Поэтому для оценки свойств поверхностного слоя по данным сантиметровых радиолокационных измерений необходимо учитывать ослабление радиоволн в атмосфере. Результаты измерений эффективной площади рассеяния Венеры на разных длинах волн свидетельствуют о десятикратном ослаблении радиолокационного сигнала в атмосфере для длины волны 3 см.

Наличие плотной поглощающей радиоволны атмосферы приводит к тому, что радиоизлучение планеты в короткой части санти-

метрового и в миллиметровом диапазоне формируется главным образом в атмосфере, а не в твердой поверхности. Причем чем короче длина волны, на которой производятся радиоастрономические измерения, тем более низкую радиояркую температуру планеты фиксирует аппаратура. Это обусловлено уменьшением кинетической температуры с ростом высоты в атмосфере. На рис. 2.16 показана рассчитанная А. П. Наумовым зависимость высоты излучающего слоя в атмосфере планеты от длины волны. Как видно из рисунка, только радиоизлучение на длинах волн более 4 см соответствует излучению твердой поверхности планеты. На рис. 2.17 приведены результаты измерения радиоизлучения Венеры в широком диапазоне длин волн; сплошные линии — рассчитанные Кузьминым [48] спектры радиоизлучения планеты при различном содержании водяного пара в ее атмосфере.

Наземные радиоастрономические наблюдения Венеры позволили измерить температуру ее поверхности. Путем радиоинтерферометрических измерений удалось определить вариации поверхностной температуры как вдоль экватора, так и вдоль меридиана. По данным этих измерений, выполненных на длине волны $\lambda_0 = 13$ см Синклером и др. [143], разность поверхностных температур в районах полюса и экватора составляет около 17 К, а вариации локальных температур вдоль экватора равны $(18 \pm 9,2)$ К. Резуль-

таты этих измерений находятся в хорошем согласии с расчетными данными. Из-за огромной тепловой инерции атмосферы и парникового эффекта вариации температуры на поверхности Венеры не могут быть велики. По расчетам, вариации локальной температуры поверхности на экваторе в течение солнечных суток (около 120 земных сут) не превосходят 2 К. При этом не учитывалась высота локального участка относительно среднего радиуса планеты.

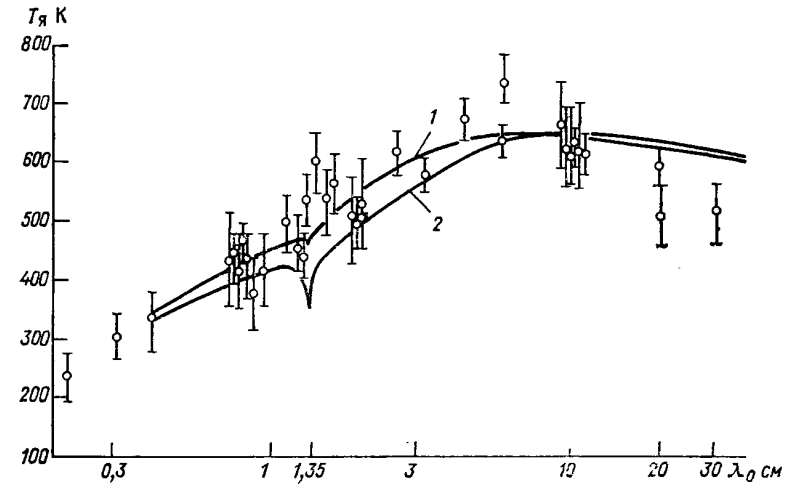


Рис. 2.17. Спектр радиоизлучения Венеры.

Сплошные линии — расчет при содержании H_2O в атмосфере (по объему) 0,1 % (1) и 0,5 % (2).

Проведенные на искусственных спутниках «Венера-15» и «Венера-16» эксперименты по измерению радиотеплового излучения на трех длинах волн дециметрового диапазона позволили получить данные для построения радиотепловых карт и карт коэффициента поляризации на каждой из указанных длин волн. Предварительный анализ полученной информации показал, что локальные изменения радиоярких температур не соответствуют локальному изменению высоты над средним уровнем поверхности, т. е. градиент изменения радиояркой температуры не соответствует адиабатическому градиенту, равному 9 К/км. Этот факт свидетельствует о том, что значение эффективной диэлектрической проницаемости различно в низменных и горных районах Венеры.

2.4. Внутреннее строение

Экспериментальные исследования внутреннего строения Луны и планет земной группы, имеющих твердые оболочки, начались сравнительно недавно. На автоматических станциях «Венера-13»

и «Венера-14» были проведены первые эксперименты по определению сейсмической активности Венеры, вероятность которой, по расчетам ученых, невелика. Однако по сообщению Л. В. Ксанфомалити [47], сейсмометр автоматической станции «Венера-14» зарегистрировал два вертикальных движения грунта с амплитудами больше и меньше $80 \cdot 10^{-6}$ см. Эти микросейсмические толчки произошли через 950 и 1361 с после посадки «Венеры-14». Сейсмометры являлись приборами электромагнитного типа, реагирующими только на вертикальное перемещение с амплитудой более $0,5 \cdot 10^{-6}$ см. По оценкам ученых, источник венеротрясения мог находиться на расстоянии около 3500 км, если его сила равна средней силе источника земных сотрясений.

Экспериментальные исследования внутреннего строения Венеры только начинаются. Пользуясь аналогиями (методами сравнительной планетологии), можно предсказать внутреннее строение этой планеты. Для этого существует хотя и не полная, но вполне определенная информация. Известны масса, размеры, средняя плотность, орбитальная скорость, скорость собственного вращения. По этим данным можно оценить момент инерции планеты. По температуре поверхности и потоку тепла, полученного планетой от Солнца, можно оценить тепловой режим верхнего покрова планеты. Базируясь на этих данных, С. В. Козловская построила модель Венеры с железным ядром. Эта модель, показанная на рис. 2.18, характеризует распределение плотности, давления и ускорения свободного падения вдоль радиуса. Согласно этой модели, планета состоит из коры толщиной 16 км, силикатной оболочки и железного ядра. Граница между ядром и оболочкой находится на глубине 3224 км. При расчете модели Козловская использовала следующие исходные данные: масса планеты $M = 4,874 \cdot 10^{27}$ г, средний радиус планеты $a = 6050$ км, средняя плотность $\rho = 5,25$ г/см³, масса ядра $M_{\pi} = 0,246M$ и безразмерный момент инерции планеты $C/Ma^2 = 0,332$ (C — полярный момент инерции).

Построенная модель базировалась на модели внутреннего строения Земли в связи с тем, что по размерам, массам и средней плотности Венера и Земля близки [24]. Кроме геометрического подобия этих планет, которое подразумевает деление их недр на кору, мантию и состоящее из железа ядро, на весьма вероятную дифференциацию планеты Венера на оболочки указывает подобное земным породам содержание урана, тория и изотопа калия. Измеренное с помощью наземной радиолокации и космических аппаратов отклонение центра фигуры от центра массы Венеры наиболее просто может быть объяснено разной толщиной коры на разных долготах в экваториальном поясе планеты.

Модель внутреннего строения Венеры, построенная Козловской, требует корректировки в связи с тем, что на Венере зарегистрированы более высокие поверхностные температуры, чем это было принято в модели, а также в связи с отсутствием у планеты собственного магнитного поля.

Уже сейчас ясно, что на Венере толщина коры должна быть более 100 км, чтобы можно было объяснить существование на планете перепада высот, равного 13 км (обнаружено по данным радиовысотомера ИСВ «Пионер—Венера-1»). Расчет Филиппа и др. [135] для перепада высот 8 км (с учетом изостазии и проч-

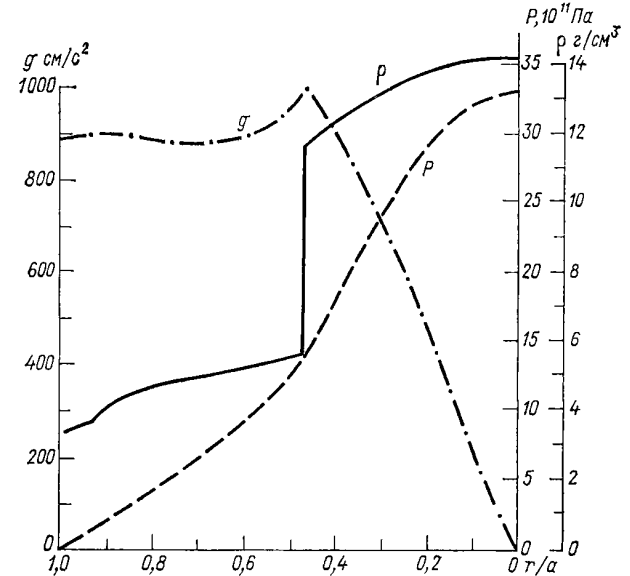


Рис. 2.18. Одна из моделей внутреннего строения Венеры с железным ядром. Распределение плотности ρ , давления P и ускорения свободного падения g вдоль радиуса r (a — средний радиус планеты).

ности материала) привел к толщине коры около 100 км. При принятых Филиппом предпосылках возвышенности более 8 км должны оседать вместе с корой внутрь мантии, как это происходит с айсбергами, плавающими в океане, когда на них нарастает слой снега. Если использовать те же исходные данные для перепада высот 13 км, толщина коры должна составлять 150 км.

С помощью искусственного спутника «Пионер—Венера-1» были начаты детальные гравитационные измерения. Метод гравитационного картирования был отработан во время полета многочисленных искусственных спутников Луны серии «Лунар Орбитер». Эти измерения основаны на отклонении реальной скорости движения космического аппарата по траектории относительно небесного тела от расчетного значения, определяемого для стационарного и симметричного поля тяготения. Наилучшим образом гравитационное поле определяется с помощью измерений траектории полета ис-

кусственных спутников, так как такой режим позволяет проводить длительные измерения при разных относительных положениях небесного тела и искусственного спутника.

Траекторные измерения, проводимые с искусственного спутника «Пионер—Венера-1», позволили выявить гравитационные аномалии на планете. Предварительное сопоставление этих аномалий с рельефом поверхности показало, что гравитационные аномалии соответствуют положительным формам рельефа (горам и возвышенностям) относительно среднего радиуса планеты с малой высотой (около 1 км). В то же время районы с большими перепадами высот (впадины и большие возвышенности) являются гравитационно компенсированными, т. е. не имеют гравитационных аномалий. В материковом районе, расположенном в экваториальной области, в восточной части видимого с Земли диска Венеры в нижнем соединении, гравитационная компенсация равна 80 %, что говорит о том, что венерианская кора имеет примерно ту же подвижность, что и кора Земли. По прогнозу гравитационные измерения на Венере будут продолжаться, что позволит получить детальную карту гравитационных аномалий на планете и оценить их размеры.

Измерение параметров гравитационного поля Венеры, выполненное с помощью космических аппаратов «Маринер-5» и «Маринер-10», показало, что недра Венеры значительно отклоняются от состояния гидростатического равновесия. Венера оказалась самой неравновесной из планет земной группы. Данный факт был установлен путем измерения разности главных моментов инерции (A и B) планеты в экваториальной плоскости относительно ортогональных осей. Для Венеры разность $(B-A)/Ma^2$ составила $(4 \pm 1,4) \cdot 10^{-5}$. Эти измерения также свидетельствуют в пользу необходимости переработки модели внутреннего строения, основанной на предположении гидростатического равновесия.

Исследование внутреннего строения Венеры с помощью доставленного на ее поверхность комплекса аппаратуры является весьма важной научной задачей. Такой комплекс (по аналогии с лунными и марсианскими исследованиями) должен содержать аппаратуру активного и пассивного сейсмического зондирования, гравиметрическую аппаратуру и аппаратуру электромагнитного зондирования (измерения диэлектрической и магнитной проницаемости, а также электропроводности).

Обнаруженное аппаратами «Венера-11, -12» и «Пионер—Венера-2» повышенное содержание в атмосфере планеты радиогенного изотопа ^{36}Ar по сравнению с его содержанием в атмосферах Земли и Марса свидетельствует о специфической тепловой истории Венеры, в связи с чем изучение внутреннего строения этой планеты становится самой актуальной научной задачей. Подобные исследования могут внести серьезный вклад в понимание проблемы происхождения и эволюции не только Венеры, но и всей Солнечной системы.

Глава 3

Состав и структурные параметры атмосферы Венеры

Для понимания процессов, происходящих в атмосфере Венеры, необходимы прежде всего сведения о составе атмосферы (включая облака), особенностях ее теплового режима и динамики. Про-

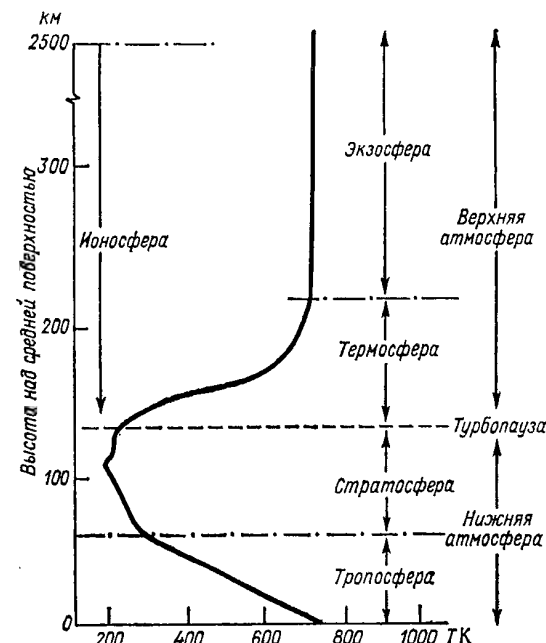


Рис. 3.1. Структура атмосферы Венеры.

блемы атмосферной циркуляции, а также состава и структуры облаков будут обсуждены далее. Обратимся поэтому сейчас к рассмотрению закономерностей состава атмосферы и вертикальных профилей структурных параметров. На рис. 3.1 схематически изображена вертикальная структура атмосферы Венеры, построенная по аналогии со структурой земной атмосферы.

Исследования, выполненные с помощью АМС «Венера-4», имели пионерский характер [1, 4, 7, 11, 24, 30, 34]. Анализ результатов измерений впервые показал, что венерианская атмосфера состоит в основном из углекислого газа ($90 \pm 10\%$). Содержание кислорода не может превышать 1—1,5 %, азота — 7 % (возможно, меньше 2,5 %). Концентрация водяного пара составляет 1—8 мг/л. Не исключено присутствие в атмосфере Венеры малых количеств

аргона и других инертных газов. В дальнейшем эти данные были существенно уточнены, но результаты первых прямых измерений, обнаружившие преимущественно углекислый состав атмосферы Венеры, вошли в историю исследований этой планеты как основополагающий этап.

Как отметили Ю. Н. Ветухновская и А. Д. Кузьмин [11], данные осуществленных на АМС «Венера-4» прямых измерений состава и структурных параметров венерианской атмосферы позволили более надежно интерпретировать полученные ранее результаты наземных радиоастрономических и радиолокационных измерений и на основе совместного анализа всей этой информации получить новые сведения об атмосфере Венеры. Измерения состава атмосферы дали, в частности, возможность объяснить изменчивость радиояркостной температуры и эффективного сечения отражения радиолокационного сигнала (поглощение радиоизлучения обусловлено главным образом углекислым газом), тогда как радиоастрономические и радиолокационные измерения позволили оценить температуру и давление на уровне средней поверхности планеты.

Анализ результатов радиоастрономических и радиолокационных измерений привел к выводу, что температура у поверхности Венеры равна 700 ± 100 К, а атмосферное давление составляет $65_{-15}^{+25} \cdot 10^5$ Па, хотя возможно и более низкое значение температуры (650_{-50}^{+100} К), но более высокое давление ($130 \cdot 10^5$ Па). По данным прямых и радиорефракционных измерений в 50-км диапазоне высот, с уменьшением высоты происходит повышение температуры от 240 до 600 К и увеличение давления от $0,03 \cdot 10^5$ до $27 \cdot 10^5$ Па. Согласно первоначальным данным, наиболее вероятные значения температуры и давления у поверхности составляют 700 ± 100 К и $75_{-25}^{+50} \cdot 10^5$ Па.

Полученные при помощи АМС «Венера-4» результаты были использованы для построения первой эмпирической модели структуры атмосферы (вертикальные профили давления, температуры и плотности) в предположении следующего химического состава атмосферы: 90 % углекислого газа и 10 % азота (средняя относительная молекулярная масса равна 42,4).

Важный этап исследований Венеры составили наблюдения при помощи АМС «Венера-9» и «Венера-10», запущенных 8 июня и 14 июня 1975 г. [7, 8, 16, 18, 51, 52, 65, 73]. Измерения параметров атмосферы с СА в целом подтвердили полученные ранее результаты, однако была выявлена более высокая дневная температура по сравнению с ночной на высотах 40—50 км. Температура у поверхности составила 460°C , давление — $90 \cdot 10^5$ Па, что свидетельствует о том, что район посадки на 1,5—2 км выше средней поверхности, которой соответствует планетоцентрический радиус 6051 км. По данным измерений с СА скорость ветра мала — примерно 0,5—1 м/с. Согласно доплеровским измерениям с ИСВ, значения переменного по высоте зонального компонента скорости ветра

достигают 60 м/с на высоте 50 км. Радиопросвечивание атмосферы позволило получить сведения о вертикальных профилях структурных параметров.

Интегральный поток на поверхности равен около 100 Вт/м^2 , освещенность — 14 тыс. лк. По данным фотометрического эксперимента, облачный слой имеет клочковатую структуру и удовлетворяет модели консервативного рассеяния. Отношение смеси водяного пара на высоте 40 км равно примерно 10^{-3} .

По данным нефелометрического комплекса, нижняя граница облаков находится на высоте около 49 км, причем облачность имеет ярусную (слоистую) структуру. Анализ данных ИК измерений свидетельствует о размытости верхней границы облаков и тепловой асимметрии планеты (ночная сторона значительно теплее дневной). Впервые получены надежные данные о спектрах свечения ночного неба планеты. Результаты радиопросвечивания ионосферы позволили выявить значительные изменения профиля электронной концентрации в различное время суток. Проводились исследования магнитного поля, межпланетной плазмы, космических лучей и др.

Новым важным вкладом в исследования Венеры явилось успешное выполнение научных программ АМС «Венера-11», «Венера-12» и «Пионер—Венера» [5, 7, 13—15, 30, 31, 54, 62, 88, 89, 117, 131, 144].

Эксперименты, успешно проведенные во время спуска станций «Венера-11, -12» в атмосфере планеты, были направлены на решение следующих основных задач: 1) тонкий химический анализ состава атмосферы, 2) изучение природы облаков, 3) исследования теплового баланса атмосферы. Для этого был использован комплекс приборов, включающий: масс-спектрометр, газовый хроматограф, оптический спектрометр и фотометр, нефелометр, рентгеновский и флуоресцентный спектрометры, прибор для измерения электрической активности атмосферы. Во время экспериментов выполнены также измерения температуры, давления и аэродинамических перегрузок.

Прямые измерения на СА «Венера-11» и «Венера-12» позволили получить данные о температуре и давлении в диапазоне высот 0—50 км. Регистрация перегрузок в период аэродинамического торможения обеспечила косвенное определение параметров атмосферы для слоя 70—105 км. На рис. 3.2 и 3.3 приведены полученные В. С. Авдеевским и др. [5] вертикальные профили давления и температуры в атмосфере Венеры. Рисунок 3.4 характеризует составленную В. В. Кержановичем и др. [25] сводку результатов восстановления вертикальных профилей скорости ветра по данным доплеровских измерений с различных космических аппаратов. Быстрое нарастание скорости ветра с высотой наблюдается в слое 10—20 км. Показателем турбулентности атмосферы являются пульсации скорости ветра, составляющие около 1 м/с при макси-

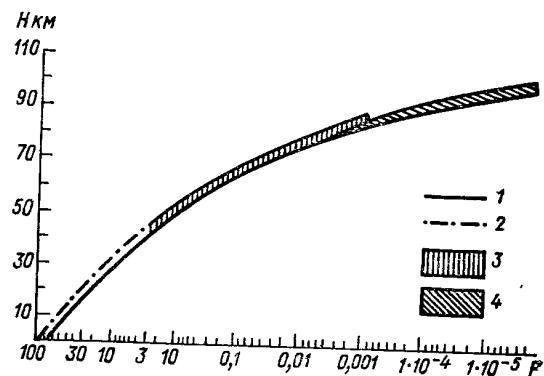


Рис. 3.2. Вертикальный профиль давления в атмосфере Венеры по различным данным.

1 — СА «Венера-11 и -12»; 2 — СА «Венера-9 и -10», 3 — радиопросвечивание; 4 — перегрузки.

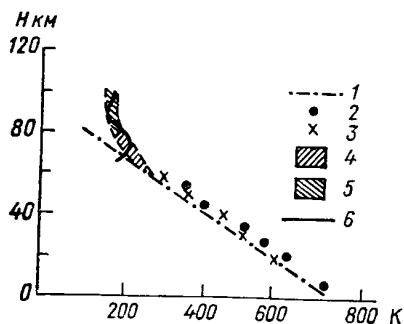


Рис. 3.3. Вертикальный профиль температуры в атмосфере Венеры по различным данным.

1 — СА «Венера-11 и -12», 2 — СА «Венера-9», 3 — СА «Венера-10», 4 — радиопросвечивание, 5 — перегрузки СА «Венера-11 и -12», 6 — перегрузки полярного СА «Пионер-Венера».

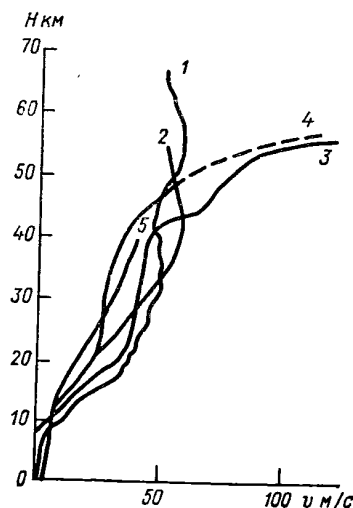


Рис. 3.4. Вертикальный профиль скорости ветра.

1 — «Венера-12», 2 — «Венера-9, -10», 3 — «Венера-8», 4 и 5 — соответственно дневной и ночной СА «Пионер-Венера».

Установленные на спускаемых аппаратах АМС «Венера-11» и «Венера-12» идентичные масс-спектрометры взяли первую пробу на высоте около 23 км и работали до посадки. Последние пробы газа

относятся к высотам от 3 до 1,5 км над поверхностью планеты. Общее число проб составило 11, что позволило передать на Землю 176 масс-спектров, характеризующих химический и изотопный состав нижних слоев атмосферы Венеры. Погрешности измерений, зависящие главным образом от погрешностей определения состава используемых для предполетных калибровок модельных смесей, в случае таких «основных» малых компонентов, как азот и аргон, равны примерно 20 %, а для составляющих, концентрация которых находится на пределе обнаружения (например, неон и криптон), достигают +100 %, —50 %.

Как показали В. Г. Истомин и др. [42] на основе анализа первых масс-спектров, основной малой примесью в атмосфере Венеры является азот, концентрация которого (по объему) составляет $4,5 \pm 0,5$ %. Концентрация всех прочих примесей (как инертных газов, так и химических активных газов и паров) не превышает нескольких сотых долей процента. Почти на пределе чувствительности для одного спектра обнаруживается водяной пар.

Масс-спектрометры зарегистрировали ряд инертных газов: три изотопа аргона (36, 38 и 40 а. е. м.), неон (20 а. е. м.) и криптон (84 а. е. м.). Изотопный состав аргона в атмосфере Венеры резко аномален по сравнению с составом аргона в атмосфере Земли: концентрация «вторичного» (радиогенного) ^{40}Ar равна сумме концентраций «первичных» изотопов ^{36}Ar и ^{38}Ar (на Земле концентрация ^{40}Ar в 300 раз выше, чем концентрация ^{36}Ar). Однако отношение концентраций ^{36}Ar и ^{38}Ar соответствует земному. По предварительной оценке, суммарная относительная концентрация аргона равна $(150 \pm 50) \cdot 10^{-6}$ при следующем соотношении концентраций: $(42 \pm 2) \% ^{36}\text{Ar}$, $(8 \pm 2) \% ^{38}\text{Ar}$, $(50 \pm 2) \% ^{40}\text{Ar}$. Концентрации изотопов неона (^{20}Ne) и криптона (^{84}Kr) составили $(10 \dots 15) \cdot 10^{-6}$ и $(0,5 \dots 0,8) \cdot 10^{-6}$ соответственно. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с данными АМС «Пионер-Венера», за исключением данных об азоте, причины расхождения которых остаются неясными (впрочем, и данные об азоте совпадают с результатами первого анализа при помощи установленного на АМС «Пионер-Венера» газового хроматографа, которые авторы эксперимента не считают, однако, достаточно надежными).

Теоретическая интерпретация масс-спектрометрических данных, выполненная М. Н. Изаковым [21], привела к выводу, что атмосфера Венеры является целиком первичной и практически полностью обусловлена аккрецией газа из протопланетной туманности.

На спускаемом аппарате «Венера-12» был установлен газовый хроматограф «Сигма», в котором использовался высокочувствительный ионизационный детектор (с источником β -излучения). Три последовательно расположенные колонки и три детектора были предназначены для разделения: 1) сернистых соединений (H_2S , COS , SO_2) и паров воды; 2) низкокипящих газов (гелий, во-

дород, аргон с кислородом, азот, криптон, метан, окись углерода); 3) аргона. Порог чувствительности всех трех детекторов составлял $10^{-5}\%$ (по объему), что обеспечивает чувствительность анализа на уровне $10^{-4}\%$ при объеме рабочей дозы до 1 см^3 . За время спуска СА с высоты 42 км до момента посадки было выполнено восемь анализов состава атмосферы. Всего получено 54 хроматограммы, из которых 18 использованы для определения сернистых соединений и воды, а 27 — для анализа низкокипящих газов.

Установка на спускаемых аппаратах «Венера-13» и «Венера-14» усовершенствованной газохроматографической аппаратуры позволила осуществить измерения концентрации в атмосфере Венеры более многочисленной совокупности газовых компонентов, чем ранее. Полученные Л. М. Мухиным и др. [59] данные (табл. 3.1) иллюстрируют результаты, которые хорошо согласуются с результатами предшествующих измерений (в тех случаях, когда они имеются). Дальнейшая обработка хроматограмм предусматривает уточнение результатов анализа для водорода и сернистых соединений.

Таблица 3.1
Химический состав атмосферы Венеры

Компонент	Концентрация, % (по объему)	Высота взятия пробы, км
H ₂	$(2,5 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	58—49
O ₂	$(1,8 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$	58—35
Kr	$(7 \pm 3) \cdot 10^{-5}$	49—37
H ₂ O	$(7 \pm 3) \cdot 10^{-2}$	58—49
H ₂ S	$(8 \pm 4) \cdot 10^{-3}$	37—29
COS	$(4 \pm 2) \cdot 10^{-3}$	37—29
SF ₆	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-5}$	58—35
N ₂ O	$\sim 1 \cdot 10^{-5}$	58—35

Установленные на спускаемых аппаратах «Венера-11» и «Венера-12» спектрометр и сканирующий фотометр позволили осуществить измерения спектрального и углового распределения интенсивности рассеянной солнечной радиации в зависимости от высоты (в пределах высот от примерно 65 км до поверхности), целью интерпретации которых было решение следующих задач: 1) определение вертикального профиля лучистого притока тепла; 2) изучение структуры облачного слоя; 3) выявление химической природы малых газовых и аэрозольных поглощающих компонентов в атмосфере Венеры.

Направленный в зенит спектрометр с клиновым интерференционным фильтром, имеющий поле зрения около 20° (по уровню 0,5),

позволяет регистрировать спектры в интервалах длин волн 430—700 нм (разрешение около 22 нм) и 700—1170 нм (разрешение 35 нм). Сканирующий в вертикальной плоскости фотометр снабжен светофильтрами, которым соответствуют эффективные длины волн 490, 710, 1000 и 1300 нм. Измерения выполнены вблизи экватора при зенитном расстоянии Солнца около 20° . Спуск с высоты 65 км до поверхности продолжался 62 мин.

Как отметили Ю. М. Головин и др. [15], во время спуска СА «Венера-11» (25 декабря 1978 г.) и «Венера-12» (21 декабря 1978 г.) получено 328 спектров в диапазоне высот 64—0 км. На рис. 3.5 приведен пример спектров рассеянной радиации, зарегистрированных

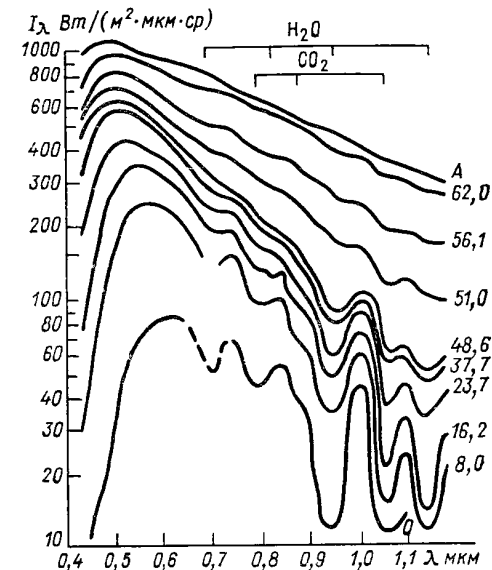


Рис. 3.5. Спектры рассеянной радиации по данным СА «Венера-11».

Цифры у кривых — высота в километрах; кривая А характеризует внеатмосферное распределение энергии в спектре Солнца.

с «Венеры-11». Кривые, соответствующие высотам 62; 56,1 и 51 км, относятся к облачному слою. Последний спектр (0 км) получен сразу после посадки. На рис. 3.6 воспроизведены вертикальные профили интенсивности рассеянной радиации в зените для различных длин волн, наглядно иллюстрирующие вертикальную неоднородность атмосферы.

Анализ примерно 500 спектров и данных об угловом распределении характеризует изменение спектрального распределения энергии в процессе спуска СА, обусловленное рассеянием на частицах облаков (аэрозоля), молекулярным рассеянием и молекулярным поглощением в полосах углекислого газа и водяного пара. В спектрах, зарегистрированных с поверхности Венеры и вблизи нее, проявляются глубокие полосы углекислого газа (0,78; 0,87; 1,05 мкм) и водяного пара (0,82; 0,95; 1,14 мкм). В диапазоне высот от уровня раскрытия парашюта до поверхности интенсивность рассеянной радиации в интервале длин волн 0,60—0,85 мкм уменьшается примерно в 10 раз, а в пределах слоя облачности — всего в два раза. Объемный коэффициент рассеяния максимален вблизи

нижней границы облаков, расположенной на высоте 48—50 км.

Оценки оптической плотности облачного слоя в месте посадки СА «Венера-11» дали значения в интервале 25—37. Приближенная оценка альbedo поверхности по данным СА «Венера-12» привела к значению $0,07^{+0,05}_{-0,02}$ в интервале длин волн 0,56—0,68 мкм, что хорошо согласуется с результатами предыдущих измерений. Значительно более светлой оказалась поверхность в месте посадки СА «Венера-11».

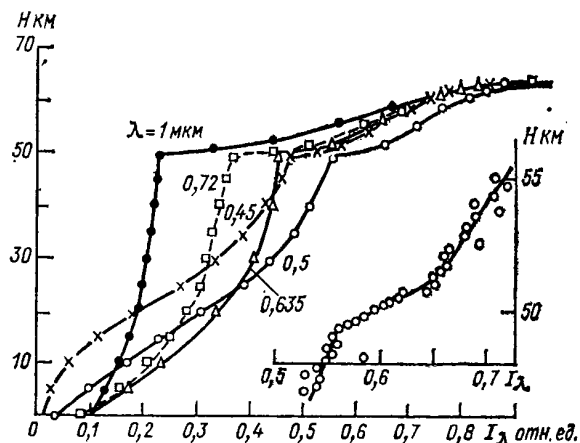


Рис. 3.6. Вертикальные профили интенсивности рассеянной радиации в зените на различных длинах волн по данным СА «Венера-11».

Спектры рассеянной солнечной радиации, нормированные по отношению к спектрам на уровне верхней части облачного слоя (они мало отличаются от спектра прямой солнечной радиации), выявляют значительное возрастание ослабления по мере спуска СА до уровня 47—48 км, т. е. внутри слоя облачности. Спектры на высотах 38 и 47 км практически идентичны, что указывает на выход СА из облачного слоя. Ниже уровня 38 км (вплоть до поверхности) монотонно увеличивается глубина полос CO_2 и H_2O . Более сильным, чем рэлеевское, оказывается ослабление в сине-зеленой области спектра. Возможно, это обусловлено поглощением такими компонентами, как газообразная сера, Vt_2 и NO_2 .

Осуществленное В. И. Морозом и др. [54—56] сравнение измеренного спектра пропускания слоя атмосферы 0—47 км с расчетным (для различных моделей атмосферы) привело к выводу, что относительная концентрация водяного пара (определенная по отношению к CO_2) на любой высоте не превосходит уровня порядка 10^{-4} . По-видимому, этот результат указывает на завышенность данных АМС «Пионер—Венера», согласно которым относительная концентрация водяного пара может достигать 0,5 % (на

высоте 34 км), хотя по данным прямых измерений АМС «Венера-13» и «Венера-14» [69] концентрация оказалась равной 0,2 %. При анализе новых данных обнаружено неожиданное возрастание относительной концентрации водяного пара от примерно $2 \cdot 10^{-5}$ у поверхности до $2 \cdot 10^{-4}$ в облачном слое. Возможно, это связано с поглощением H_2O породами, слагающими поверхность планеты.

Оценка по данным о поглощении в области длин волн короче 600 нм привела к значению относительной концентрации газообразной серы ($\text{S}_2 + \text{S}_4 + \text{S}_6 + \text{S}_8$) в подоблачном слое порядка 10^{-8} . Если считать, что рассматриваемое поглощение обусловлено бромом или двуокисью азота, то их относительные концентрации составляют 10^{-10} или $5 \cdot 10^{-10}$ соответственно. Для верхнего предела концентрации молекулярного хлора получено отношение смеси порядка 10^{-8} . Доля достигающего поверхности Венеры интегрального потока солнечной радиации составляет около 3 %. Анализ вертикальных профилей нормированной яркости неба в зените отчетливо выявляет нижнюю границу облаков, а также их вертикальную структуру (не менее чем трехслойную).

На АМС «Венера-15» и «Венера-16» были установлены Фурье-спектрометры с целью измерений спектрального распределения уходящей длинноволновой радиации (УДР) в интервалах длин волн 6,2—38 мкм («Венера-15») и 6,2—25 мкм («Венера-16») при спектральном разрешении около 5 см^{-1} . Угол зрения спектрометров составляет $5 \cdot 10^{-3}$ рад ($4 \times 4^\circ$, что соответствует примерно 100 км на уровне верхней границы облаков), время регистрации спектра 5,5 с, эквивалентный уровень шумов $2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{ср} \cdot \text{см}^{-1})$. Периоды орбит с периодом 24 ч располагались вблизи 63° с. ш., и поэтому зарегистрированные спектры УДР относятся к высоким широтам северного полушария (за 25 мин подспутниковая траектория проходила от 30° с. ш. через полюс до 25° с. ш.).

Ортель и др. [150] привели спектры УДР, иллюстрирующие возможности идентификации эмиссионных полос углекислого газа, водяного пара, сернистого газа и серной кислоты. При анализе спектров выявлены различия в форме контуров крыльев 15-мкм полосы CO_2 и в интенсивности различных слабых полос, свидетельствующие о существовании неоднородностей структуры облачного покрова выше 60 км. Спектры УДР Земли и Венеры отчетливо различаются вследствие отсутствия озона (полосы 9,6 мкм) на Венере.

Данные, относящиеся к 15-мкм полосе CO_2 , были использованы для восстановления вертикальных профилей температуры. Построение меридиональных профилей температуры на различных уровнях привело к выводам о существовании следующих закономерностей: 1) в полосе широт меньше 60° имеет место монотонное уменьшение температуры с высотой, но севернее 60° с. ш. часто наблюдаются инверсии или изотермия в слое 10—100 гПа;

2) атмосфера в полярных широтах (больше 60°) теплее, чем в низких, причем контраст температуры убывает с высотой от примерно 20 К на уровне 100 гПа до 5 К на уровне 1 гПа. Проявлений суточного хода температуры установить не удалось. Хотя ранее был обнаружен суточный ход УДР с максимумом на ночной стороне Венеры, рассматриваемые данные не подтвердили этого вывода. По-видимому, зарегистрированная по данным АМС «Венера-9» и «Венера-16» тепловая асимметрия планеты представляет собой временное явление.

Наиболее сильная неоднородность глобального поля УДР проявляется в наличии полярного максимума: интегральная УДР вблизи полюса примерно на 20 % больше, чем в низких широтах. Сопоставления измеренных спектров УДР с рассчитанными позволили выявить некоторые особенности вертикальной структуры облачного покрова. Приближенные оценки отношений смеси водяного пара и сернистого газа привели к значениям, равным $(1-10) \text{ млн}^{-1}$ и 1 млн^{-1} соответственно.

На СА «Венера-12» была впервые предпринята попытка определения элементного состава аэрозоля венерианских облаков при помощи рентгенофлуоресцентного анализатора. При предварительном анализе данных для участка парашютного спуска (высоты 60—45 км) обнаружено присутствие хлора и возможное наличие серы. Исключена вероятность существования ртути при концентрации, превышающей $1 \cdot 10^{-9} \text{ г/см}^3$.

Задачей одного из экспериментов, осуществленных в рамках научной программы АМС «Венера-11 и -12», было изучение электрической активности атмосферы планеты. Предназначенный для решения этой задачи прибор «Гроза» представляет собой миниатюрный сверхдлинноволновый спектроанализатор диапазона 8—100 кГц с высокой пороговой чувствительностью. Прибор имеет четыре канала: 10, 18, 36 и 80 кГц с полосами пропускания шириной 1,6; 2,6; 4,6 и 15 кГц соответственно. Установленный на спускаемых аппаратах прибор функционировал в диапазоне высот от 60 км до поверхности планеты.

Зарегистрированы радиосумы, весьма сходные с земными атмосферными радиосумами, возникающими при грозовых электрических разрядах. При спуске «Венеры-11» грозовые явления были весьма интенсивными, с частыми разрядами, в то время как при спуске «Венеры-12» грозовая обстановка была более спокойной (под грозовой обстановкой понимается наличие электрических разрядов в атмосфере). Обнаружены, в частности, большие всплески, состоящие из тысяч отдельных разрядов. В период с 6 ч 04 мин до 6 ч 11 мин (время московское) прибор СА «Венера-11» зарегистрировал на высотах 17—13 км периодическую последовательность из шести больших всплесков, идущих друг за другом с нарастающей амплитудой.

Как отметили Р. З. Сагдеев и В. И. Мороз [64], научная программа АМС «Венера-13» и «Венера-14» по широте и качеству существенно превзошла все предшествующие программы по изу-

чению Венеры при помощи АМС. Комплексные исследования планеты включали следующие направления: 1) структура и динамика атмосферы, 2) химический и изотопный состав атмосферных газов, 3) физические характеристики и состав облаков, 4) состав грунта, 5) геологические и физические характеристики поверхности, 6) внутреннее строение.

Много новых данных о составе и структурных параметрах атмосферы получено при помощи посадочных аппаратов АМС «Вега». По данным АМС «Вега-2», температура и давление у поверхности составили соответственно 733 К и $89,3 \cdot 10^5$ Па. Типичные значения вертикальной скорости ветра по данным аэростатного эксперимента равны 1—2 м/с и обусловлены, по-видимому, термической конвекцией.

Богатые сведения о составе и структуре атмосферы Венеры содержат данные, полученные в рамках программы АМС «Пионер—Венера». Главными целями осуществленной в США программы АМС «Пионер—Венера» являлись [88]: 1) глобальное картирование облаков, атмосферы и ионосферы с применением различных методов дистанционного зондирования и радиопросвечивания, дополненных прямыми измерениями на спускаемых аппаратах (СА); 2) глобальные прямые измерения характеристик верхней атмосферы и ионосферы, а также исследование взаимодействия солнечного ветра с атмосферой при помощи искусственного спутника Венеры (ИСВ) с сильно вытянутой орбитой и СА;

3) прямые измерения структуры и состава нижних слоев атмосферы при помощи СА; 4) изучение поверхности планеты на основе применения методик дистанционной индикации; 5) выявление пространственно-временной структуры гравитационного поля по возмущениям орбиты ИСВ.

Для решения перечисленных задач использованы ИСВ и четыре СА, доставленные при помощи транспортной АМС, в число которых входят один большой СА (БСА) и три идентичных малых СА (МСА).

В комплекс научной аппаратуры ИСВ входят 12 приборов: 1) масс-спектрометр нейтральных частиц, 2) масс-спектрометр ионов, 3) анализатор по методу замедляющего потенциала, 4) датчик электронной температуры, 5) ультрафиолетовый спектрометр, 6) анализатор плазмы солнечного ветра, 7) магнетометр, 8) инфракрасный радиометр, 9) облачный фотополариметр, 10) радиовысотометр, 11) датчик электрического поля, 12) датчик гамма-излучения.

Большой спускаемый аппарат выполнил зондирование атмосферы в диапазоне высот 0—200 км; время спуска составило около 57 мин. Функционирование СА на поверхности планеты не планировалось. Прямые измерения с БСА, спускающегося на парашюте, начинались с высоты 67 км, причем на высоте 47 км отделился парашют с последующим свободным падением СА в течение

ние 39 мин. МСА совершали спуск без парашютов; измерения производились с высоты 65—72 км в течение 57 мин в разных точках планеты (в обоих полушариях). Два МСА совершили измерения на ночной стороне, а остальные СА — на дневной стороне Венеры. Измерения с транспортной АМС при входе в атмосферу возможны до высоты около 115 км, после чего происходит ее сгорание.

В комплекс научной аппаратуры БСА входят семь приборов: 1) масс-спектрометр нейтральных частиц, 2) газовый хроматограф, 3) датчик структурных параметров, 4) солнечный радиометр, 5) инфракрасный радиометр, 6) спектрометр размеров облачных частиц, 7) нефелометр. На борту МСА установлены: 1) датчики структурных параметров, 2) нефелометр, 3) балансометр. С транспортной АМС производились измерения при помощи масс-спектрометров нейтральных частиц и ионов. Выполнены также различные виды радиоизмерений.

С целью дальнейших исследований поверхности и внутреннего строения планеты в программу «Пионер—Венера» были включены три эксперимента. С помощью радиовысотомера (РВ), функционирующего в полосе S (1,757 ГГц), при наличии антенны диаметром 38 см производились следующие измерения: 1) определение высоты поверхности относительно центра массы с точностью около 100—300 м; 2) оценка диэлектрической постоянной и статистических характеристик мелкомасштабной шероховатости поверхности; 3) получение радиолокационных изображений примерно 40 участков поверхности Венеры (50° ю.ш.—75° с.ш.) с разрешением 40—80 км (в периферии орбиты разрешение в надире достигает 8 км). Данные радиослежения в полосе S (на частоте около 2,2 ГГц) позволяют изучить нерегулярность гравитационного поля. Три датчика бортового магнетометра предназначены для получения данных о глобальном магнитном поле. Весь комплекс данных сделал возможным построение топографических, геологических, гравиметрических и магнитометрических глобальных карт. Интерпретация этих карт открыла более широкие перспективы изучения: 1) состава и термической эволюции планеты; 2) основных геологических или геофизических провинций; 3) тектонической активности в прошлом и в настоящем времени; 4) эволюции магнитного поля.

Программа исследований состава и структуры атмосферы Венеры при помощи комплекса аппаратуры, установленной на ИСВ и СА «Пионер—Венера», предусматривает решение многих ключевых проблем. Это касается как объяснения закономерностей современного состава атмосферы и облаков, поверхности и твердой оболочки планеты, влияния солнечного ветра и ультрафиолетового излучения на верхнюю атмосферу, так и проблем происхождения и эволюции атмосферы. Поскольку ранее прямые измерения состава нижних слоев атмосферы относились только к CO_2 и водяному пару (АМС «Венера», радиоастрономические измерения водяного пара), очень важное значение имеют измерения кон-

центрации различных других газовых компонентов. В частности, данные о вертикальных профилях CO и O_2 необходимы для того, чтобы объяснить, почему эти газы не были спектроскопически обнаружены в количествах, соответствующих происходящей в венерианской атмосфере фотохимической диссоциации CO_2 .

Большое внимание привлекает цикл серы, связанный с образованием облаков, что определяет необходимость измерения концентраций H_2O_2 , HO_2 , CO_2 , SO_2 , SO_3 , CO и H_2O . Содержание водяного пара и окислов серы должно служить индикатором концентрации серной кислоты в облаках и возможности формирования облаков за счет цикла серы. Определение содержания таких малых компонентов, как HCl , HF , CO , H_2O , соединения ртути и серы, представляет интерес для выявления условий химического равновесия между поверхностью планеты и атмосферой, оценки интенсивности химического выветривания грунта, активности вулканических и тектонических процессов. Большое значение имеют: надежные прямые измерения температуры атмосферы, поскольку горизонтальные контрасты температуры малы; выявление природы парникового эффекта и его роли в формировании теплового режима; изучение влияния фазовых превращений на тепловой режим. Обширный круг нерешенных вопросов относится к изучению верхней атмосферы Венеры, исследованиям происхождения и эволюции венерианской атмосферы. Особое внимание привлекает в связи с этим установление причин сильных различий состава, теплового режима и динамики атмосфер Венеры и Земли.

Естественно, что выводы о свойствах облачного покрова, полученные на основе применения косвенных методов или теоретических соображений, требуют проверки путем прямых измерений. Особенно это относится к вертикальной структуре облаков. Специального внимания требует целый ряд вопросов, касающихся взаимодействия микрофизики и динамики облаков. На решение упомянутых и ряда других вопросов направлен тот комплекс экспериментов в рамках программы «Пионер—Венера», который имеет целью исследование облачного покрова.

Установленные на БСА и трех МСА нефелометры измеряют фоновую интенсивность рассеянного света неба длин волн 320—390 нм и 460—580 нм для зенитных углов 85° (БСА) и 80° (МСА). Основной канал нефелометра, данные которого позволяют определить произведение счетной концентрации частиц на эффективный поперечник рассеяния назад, функционирует на длине волн 900 нм.

Спектрометр размеров облачных частиц (СРОЧ), находящийся на БСА, обеспечивает измерения концентрации частиц в диапазонах радиусов 0,5—5; 5—20; 20—200 и 50—500 мкм, а также оценку асимметрии формы частиц. Спектр частиц регистрируется при спуске СА (67—0 км, высотное разрешение повышается по мере спуска от 800 до 100 м) не менее чем через 8 с.

Аппаратура фотополариметра позволяет не только измерить яркость и поляризацию света, но и получить глобальные изображения облачного покрова (за 3,5 ч) и профили яркости лимба в интервале 650—750 нм. Задачей инфракрасного радиометра является получение сведений о полях температуры и влажности по данным измерений теплового излучения на длинах волн 2, 15 и 45 мкм.

Ультрафиолетовый спектрометр предназначен для регистрации спектров в диапазоне 190—340 нм при разрешении 0,15 нм (горизонтальное пространственное разрешение составляет $3 \times 0,5$ км). Масс-спектрометр допускает идентификацию и определение относительной концентрации газовых компонентов в диапазоне массовых чисел 1—208.

Важной задачей интерпретации данных оптических измерений является совместное использование этих данных для восстановления таких параметров облачности, как массовая концентрация капель, оптическая плотность облаков, альbedo однократного рассеяния, микроструктура, что имеет большое значение для исследования происхождения в облаках процессов. Большой интерес представляет обнаружение малых количеств гидратов серной кислоты. По-видимому, специфическая особенность венерианских облаков состоит, в частности, в том, что образование частиц облаков не сопровождается существенным выделением скрытого тепла. Однако значительный приток тепла может быть связан с гидратацией серной кислоты. Даже тепло гидратации H_2SO_4 вдвое превосходит скрытую теплоту испарения воды.

Другой требующей внимания особенностью облаков на Венере является важная роль химических превращений в процессе формирования облачного покрова. Поскольку почти все имеющиеся представления о природе венерианских облаков в известной мере предположительны, осуществление программы «Пионер—Венера» должно внести большой вклад в понимание реальной природы облаков. Важной составной частью программы АМС «Пионер—Венера» являются исследования ионосферы.

Запущенный 20 мая 1978 г. орбитальный аппарат (ОА) «Пионер—Венера» был выведен на сильно вытянутую почти полярную орбиту 4 декабря 1978 г. Вторая АМС «Пионер—Венера» с установленными на ней спускаемыми аппаратами (СА) запущена 8 августа 1978 г. и достигла планеты 9 декабря 1978 г. ОА стабилизирован вращением (при скорости от 4,90 до 4,99 об/мин), ось вращения направлена к южному полюсу эклиптики. Высота перигея варьирует в пределах 150—260 км (широта $17,0^\circ$ на пятом витке), высота апогея равна 66 900 км (долгота $170,2^\circ$ на пятом витке), эксцентриситет и средний период обращения вокруг Венеры составляют 0,843 и 24 ч 2 мин соответственно. Угол наклона орбиты к плоскости экватора равен $105,6^\circ$. Первоначальное функционирование ОА рассчитано на 243 сут.

Обработка результатов прямых измерений вертикальных профилей температуры и давления при помощи четырех СА «Пионер—Венера» («потолок» этих данных равен 66,3 км) обнаружила

малые горизонтальные контрасты над облаками, но значительные различия в пределах облачного покрова на высотах 45—61 км. На уровне 60 км спускаемый аппарат, вошедший в атмосферу на $59,3^\circ$ с.ш., зарегистрировал значения температуры, которые на высотах 60 и 50 км на 25 К и 12 К ниже соответствующих данных СА в низких широтах, причем значительные расхождения данных сохранились до (и несколько ниже) нижней границы облаков.

При температуре 270 К (высота 56—59 км), соответствующей нижней границе верхнего слоя облаков, все четыре СА зарегистрировали резкое изменение вертикального градиента температуры, что может быть обусловлено изменением фазы вещества облаков (возможно — замерзанием капель концентрированного раствора серной кислоты) или изменением химического состава облаков. Контрасты температуры день—ночь в слое 18—48 км (под облаками) близ 30° ю. ш. не превосходят 1 К. Значения давления на широте $59,3^\circ$ с.ш. были также меньшими (до 49 гПа) при среднем давлении, равном 200 гПа.

Измеренные разности давления согласуются с геострофическим балансом, определяющим скорость зонального ветра от (130 ± 20) м/с на высоте 60 км до (60 ± 17) м/с на уровне 40 км. При этом отмечается наличие несимметричного компонента ветра.

Облака оказались на 10—20 К теплее, чем это получается путем экстраполяции данных для нижней атмосферы, причем средний облачный слой (50—55 км) является конвективно неустойчивым. Предполагается, что это обусловлено влиянием поглощения восходящего потока теплового излучения, а также солнечной радиации облаками (днем). Анализ «состыкованных» данных СА и термического зондирования с ИСВ показал, что над облаками в нижней стратосфере вертикальный градиент температуры резко падает до 3,5 К/км и вертикальный профиль температуры приобретает волнообразный характер при амплитуде около ± 20 К. На высоте 100 км имеет место минимум температуры при среднем значении около 170 К.

Функционирование аппаратуры дистанционного зондирования на орбитальном аппарате «Пионер—Венера» в течение 72 сут с конца 1978 г. до начала 1979 г. позволило получить около 0,5 млн вертикальных профилей температуры в слое 60—105 км, а также данные о влагосодержании надоблачной толщи атмосферы, давлении на уровне верхней границы облаков, шкале высот, потоках уходящей длинноволновой и коротковолновой радиации. Тейлор и др. [202] детально воспроизвели (в форме таблиц) и кратко проанализировали осредненные результаты этих наблюдений. Полученные результаты свидетельствуют, в частности, о том, что зонально осредненное поле температуры и структура облачного покрова почти не зависят от широты в низких широтах (аналогичное постоянство имеет место и вдоль кругов широт). Анализ поля ветра, рассчитанного по полю температуры, показал,

что: 1) зональный компонент ветра спадает до очень малых значений выше 90 км; 2) наблюдается сильное струйное течение в умеренных широтах, которое огибает планету примерно за 2 сут; 3) в согласии с теорией, наблюдаемые солнечные приливы определяются доминирующим вкладом полусуточного компонента.

Клиоре [121] составил и проанализировал сводку результатов восстановления поля температуры атмосферы Венеры по данным радиорефракционных наблюдений при помощи АМС «Пионер—Венера» за период с декабря 1978 г. по декабрь 1983 г. Получено 123 профиля температуры в слое 40—85 км, относящихся к различным широтам от экватора до полюса. В полосе широт меньше 45° наблюдается гладкий переход от тропосферы к мезосфере при высоте тропопаузы, равной примерно 56 км. Протяженность тропосферы возрастает до 62 км в зоне полярного «воротничка» облачности (60—80° широты), где имеет место сильная температурная инверсия (до 30 К).

Температура в тропосфере понижается по направлению к полюсу, тогда как в мезосфере наблюдается меридиональный градиент температуры противоположного знака. В полярных широтах (80—90°) мезосфера становится изотермической, а инверсия отсутствует. Такого рода особенности поля температуры определяются устойчивой спецификой общей циркуляции атмосферы, состоящей в преобладании зонального обратного переноса в области широт меньше 45° с потенциальным переходом к циркумполярному вихрю в зоне «воротничка».

Расчет поля зонального термического ветра показал наличие сильного струйного течения в умеренных широтах (50—55°) при скорости до 120—140 м/с на высоте 70 км. При наблюдениях в 1983—1984 гг. обнаружено наличие над тропопаузой значительной изменчивости структуры поля температуры со временем, свидетельствующее о том, что на устойчивые черты ОЦА налагаются «погодные» вариации.

Установленный на большом спускаемом аппарате нейтральный масс-спектрометр (МС) позволил осуществить измерения состава атмосферы в интервале масс от водорода до ртути. МС успешно функционировал во всем диапазоне высот во время спуска СА (начиная с уровня 68 км), за исключением слоя близ 50 км (при нефелометрических и микроструктурных измерениях здесь обнаружен максимум концентрации частиц облаков), где входные отверстия МС оказались «блокированными» примерно на 10 мин, а затем постепенно открылись за время около 5 мин. Входные отверстия полностью очистились к высоте 30 км, после чего МС функционировал нормально до уровня удара БСА о поверхность планеты.

Динамика процесса «блокирования» показывает, что отверстия МС были «забиты» веществом в жидкой форме (каплями облаков). Анализ газов, образовавшихся при испарении частиц, позволил обнаружить максимумы при атомных единицах массы 18, 48 и 64 и более слабые максимумы при 17, 19, 32, 50 и 66 а.е.м.

Нет сомнения, что входные отверстия МС были блокированы соединением или соединениями серы в смеси с водой. Этот вывод не дает, однако, оснований отвергать представление о том, что важным компонентом облаков являются капли водного раствора серной кислоты.

Неожиданный результат состоит в обнаружении SO_2 , а не карбонилсульфида COS, который предполагался ранее как основной компонент серосодержащих соединений в нижних слоях венерианской атмосферы из-за того, что наблюдаемая над облаками высокая концентрация CO (около 50 млн $^{-1}$) характерна и для нижних слоев атмосферы. Оценки показали, что возможный верхний предел концентрации CO на высоте 24 км составляет 0,6 млн $^{-1}$ (позднее наблюдения подтвердили наличие окиси углерода). Следует, таким образом, считать, что CO продуцируется только фотохимическими процессами и поэтому нельзя ожидать высокой концентрации COS.

Значительная концентрация O_2 в нижней атмосфере указывает, по-видимому, на более высокую степень окисленности современной атмосферы, чем в геологическом прошлом, что можно объяснить влиянием фотодиссоциации водяного пара и последующей диссипации молекулярного водорода. Это в свою очередь означает, что содержание водяного пара в атмосфере Венеры было в прошлом более высоким, чем сейчас.

Осуществленная В. И. Морозом и др. [58] интерпретация данных фурье-спектрометров, установленных на АМС «Венера-15 и -16», за 14 октября 1983 г. позволила сделать вывод, что отношение смеси водяного пара на высоте 85 км составляет около 3 %, а отношение смеси сернистого газа на высоте 66 км — примерно 0,2 % (эти значения определены с точностью до 300 %).

Результаты измерений состава венерианской атмосферы имеют большое значение для понимания эволюции атмосфер планет земной группы. Таблица 3.2 содержит сводку современных данных о концентрации летучих компонентов в атмосферах Венеры, Земли и Марса. При составлении этой таблицы учтена возможность существования резервуаров некоторых летучих компонентов. В столбцах *s* указаны измеренные отношения смеси в атмосфере, а столбцы *k* содержат значения коэффициента, характеризующего возрастание отношения смеси с учетом наличия резервуара. Цифры в столбцах *y* определяют отношение масс различных компонентов к массе планеты.

Три процесса могли внести главный вклад в образование летучих компонентов на планетах земной группы: 1) столкновения с богатыми летучими компонентами кометами и астероидами; 2) захват газового материала протопланетной туманности; 3) дегазация летучих компонентов твердыми оболочками. По-видимому, инертные газы в атмосферах рассматриваемых планет являются продуктом дегазации.

Летучие компоненты на планетах земной группы: Венера (В), Земле (З), Марсе (М)

Газ	s			k			y		
	В	З	М	В	З	М	В	З	М
N ₂	0,034	0,78	0,027	1	~3	30—190	2,1·10 ⁻⁶	2·10 ⁻⁶	1,9·10 ⁻⁸1,2·10 ⁻⁷
CO ₂	0,96	0,00033	0,953	1	~2·10 ⁵	20—140	9,5·10 ⁻⁵	7·10 ⁻⁵	7,0·10 ⁻⁷4,9·10 ⁻⁶
H ₂ O	0,014	1·10 ⁻²	1·10 ⁻³	1	3·10 ⁴	3·10 ⁵ ...2·10 ⁶	5,7·10 ⁻⁸	1,6·10 ⁻⁴	4,5·10 ⁻⁶3,2·10 ⁻⁵
Ne	4,3·10 ⁻⁶	1,8·10 ⁻⁵	2,5·10 ⁻⁶	1	1	1	1,9·10 ⁻¹⁰	1,1·10 ⁻¹¹	4,2·10 ⁻⁵
Нерадиоге- нный Ar	9·10 ⁻⁶	4·10 ⁻⁵	6·10 ⁻⁶	1	1	1	8,1·10 ⁻¹⁰	4,6·10 ⁻¹¹	2,2·10 ⁻¹³
Радиоге- нный Ar	9·10 ⁻⁶	9,3·10 ⁻³	1,6·10 ⁻²	1	1	1	8,1·10 ⁻¹⁰	1,1·10 ⁻⁸	5,4·10 ⁻¹⁰

Точность измерений состава атмосферы Венеры имеет критически важное значение для проверки существующих гипотез относительно происхождения, эволюции и динамики планетарных атмосфер, а также состава облаков, что, в свою очередь, составляет основу теории происхождения и эволюции планет солнечной системы. В связи с этим были выполнены лабораторные исследования газового хроматографа (ГХ), установленного на АМС «Пионер—Венера», с целью проверить: 1) могла ли процедура регенерации столбиков ГХ, примененная для повышения чувствительности к O₂ и SO₂ перед входом СА в атмосферу, понизить чувствительность ГХ к аргону; 2) не мог ли пик массы, идентифицированный как обусловленный аргон-36, принадлежать O₂, поскольку в столбике могло происходить разделение ³⁶Ar и ⁴⁰Ar.

Лабораторные испытания дали отрицательные ответы на эти вопросы: чувствительность к аргону не уменьшилась после регенерации и не происходило разделения аргона. Поэтому результаты измерений содержания неона, азота, кислорода и аргона можно считать вполне достоверными. Испытания показали также, что во входной системе прибора не происходило образования кислорода и сернистого газа из SO₃, как не наблюдалось и обратной реакции. Это позволяет считать надежными данные о концентрациях O₂ и SO₂, полученных при помощи ГХ.

Сопоставление данных о концентрациях летучих компонентов на Венере и Земле обнаруживает близкие интенсивности дегазации твердой оболочки планет на ранней стадии эволюции, но более низкую интенсивность на Венере, чем на Земле, на более поздней стадии эволюции Венеры. Подобное предположение можно сделать, исходя из того факта, что отношение массы дегазированного радиоге-нного аргона-40 к массе Венеры примерно в 15 раз меньше соответствующего значения для Земли, хотя аналогичные отношения масс дегазированных N₂ и CO₂ практически одинаковы. Последнее указывает на возможность примерно одинаковой интенсивности дегазации на раннем этапе эволюции (в период интенсивного плавления и дегазации) с последующим переходом к более медленной дегазации.

Поскольку образование аргона-40 происходит в твердых оболочках планет непрерывно в результате радиоактивного распада ⁴⁰K, его содержание в атмосфере является индикатором интенсивности второй (медленной) стадии дегазации. Измерения при помощи ГХ показывают, что в слое, где происходит образование вещества облаков, венерианская атмосфера является окислительной, а не восстановительной. По-видимому, сернистый газ представляет собой здесь доминирующий компонент газов, содержащих серу (около 180 млн⁻¹), и концентрация свободного кислорода значительна (примерно 70 млн⁻¹), тогда как существуют жесткие ограничения верхних пределов концентраций CO (≤0,6 млн⁻¹) и COS (≤2 млн⁻¹). При таких химических свойствах атмосферы

Венеры крайне затрудняются условия образования частиц элементарной серы из газовой фазы в ходе фотохимических процессов вблизи верхней границы облаков или термохимических вблизи их нижней границы. Это исключает возможность рассматривать серу как элемент, ответственный за поглощение УФ радиации облаками и побуждает считать сернистый газ наиболее вероятным поглощающим агентом.

Осуществленный Эспозито [99] анализ данных АМС «Пионер—Венера» за первые 5 лет (1978—1983 гг.) ее функционирования позволил выявить спад отношения смеси сернистого газа вблизи уровня верхней границы облаков (40 гПа) примерно в 10 раз (с 100 до 10 млрд⁻¹). Концентрация SO₂ восстанавливалась по данным о спектре уходящей УФ радиации в интервале длин волн 110—350 нм, относящимся к длинам волн 207 и 237 нм, на которых коэффициент поглощения сернистого газа различается в 100 раз. Одновременно зарегистрировано уменьшение оптической плотности полярной надоблачной субмикронной дымки со временем (коэффициент корреляции между содержанием SO₂ и аэрозольной оптической плотности составил 0,8). Наиболее вероятным объяснением столь длительного тренда убывания содержания сернистого газа и оптической плотности дымки является предположение о происшедшем до 1978 г. крупном вулканическом извержении (как и на Земле, дымка должна формироваться после извержения в результате газозафазных реакций). Возможность подобных эпизодических глобальных возмущений атмосферы Венеры свидетельствует об ограниченной ценности стационарных моделей состава и динамики венерианского облачного покрова.

Предположение о вулканическом извержении позволяет также понять причины наблюдаемого в настоящее время отсутствия геохимического баланса между поверхностью и атмосферой Венеры. Такое же происхождение имеет, по-видимому, неспособность стационарных фотохимических моделей описать малую шкалу высот и верхний предел концентрации O₂. Несомненно, должны наблюдаться обусловленные извержениями эпизодические вариации таких химически активных компонентов, как Cl₂, CO и полиморфной серы. Оптическая плотность полярной дымки, образовавшейся после извержения, достигала 1,0; отсюда следует, что на Венере происходят значительно более мощные извержения, чем на Земле, где оптическая плотность слоя эруптивного стратосферного аэрозоля составляет (в том случае, если произошло сильное извержение) около 0,1 К.

Обработка данных измерений состава термосферы Венеры при помощи нейтрального масс-спектрометра, установленного на ИСВ «Пионер—Венера», за 60 витков позволила получить результаты, охватывающие широкий диапазон зенитного угла Солнца θ_0 от 80° вблизи вечернего терминатора до 174° (около противосолнечной точки), что дало возможность впервые исследовать суточный ход состава и температуры термосферы. На этой основе была построена эмпирическая модель зависимости состава термосферы

от θ_0 . Значения концентрации N рассматриваемых компонентов на высоте 150 км при θ_0 , равном 180°, следующие:

Компонент . . .	CO ₂	CO	N ₂	O	He
N , см ⁻³	8,0·10 ⁷	1,7·10 ⁷	5,0·10 ⁷	4,4·10 ⁸	1,3·10 ⁷

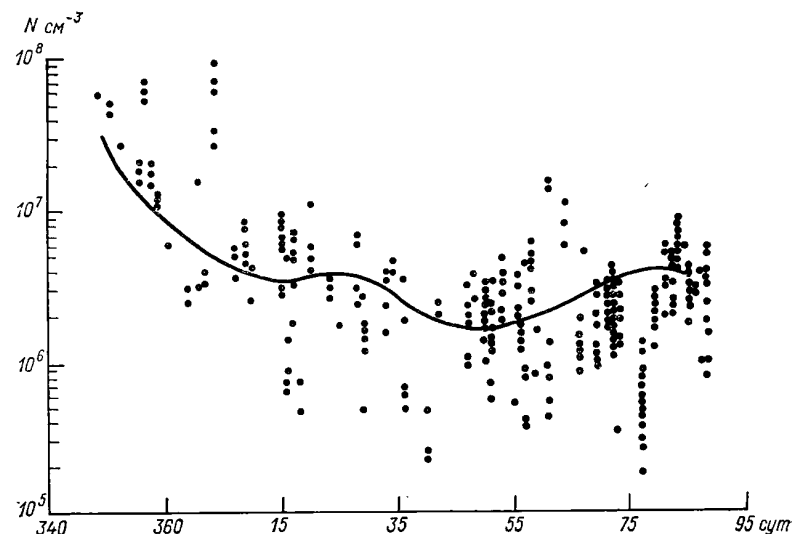


Рис. 3.7. Концентрация N молекулярного азота на высотах 165—169 км в зависимости от времени.

Концентрация всех компонентов уменьшается с ростом θ_0 ; исключение составляет гелий, концентрация которого возрастает на ночной стороне планеты, указывая на существование гелиевого «вздутия» на ночной стороне. Рисунки 3.7 и 3.8 иллюстрируют сильную изменчивость атмосферы Венеры в зависимости от времени (зенитного угла Солнца θ_0).

Весьма неожиданными оказались результаты расчета температуры тропосферы, которая быстро понижается при переходе на ночную сторону, причем минимальная температура вблизи противосолнечной точки составляет всего 112 К (у терминатора 230 К). Около θ_0 , равного 120°, наблюдается небольшой вторичный минимум температуры. Резкий спад температуры (и давления) при пересечении терминатора является качественным свидетельством справедливости разработанной Дикинсоном и Ридли модели циркуляции термосферы, согласно которой имеет место ветер, дующий с дневной на ночную сторону планеты. Однако расчеты по модели существенно расходятся с данными наблюдений, согласно которым выявляется, например, более сильный спад температуры

(по модели Дикинсона и Ридли, средняя температура на высоте 150 км на ночной стороне составляет 250 К).

Анализ вертикальных профилей концентрации различных компонентов показал (рис. 3.9), что CO и O в термосфере является исключительно результатом фотолиза CO₂, поскольку их отношения смеси на порядок больше в термосфере, чем на уровне верхней границы облаков. При этом влияние рекомбинации не сказывается до высот, значительно меньших 100 км. Важная особенность

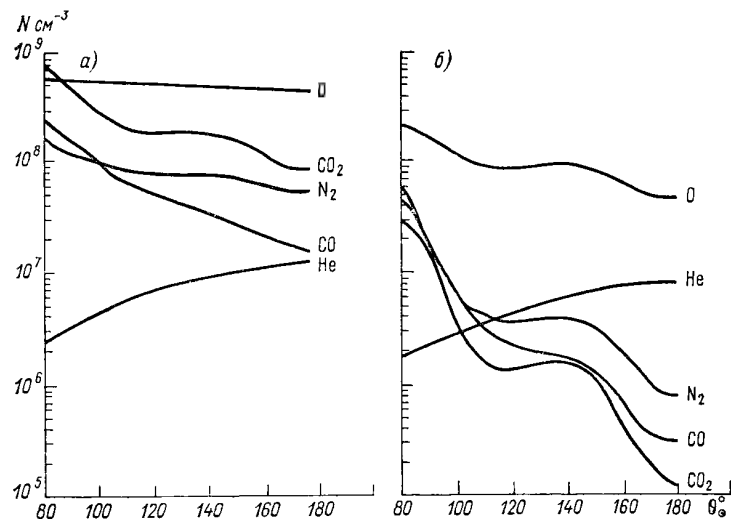


Рис. 3.8. Зависимость концентрации CO₂, CO, N₂, O и He от зенитного угла Солнца на высотах 150 км (а) и 167 км (б).

ночной термосферы Венеры состоит в ее большой изменчивости: концентрация различных компонентов сильно изменяется от витка к витку.

Установленные на АМС «Венера-13» и «Венера-14» более чувствительные, чем использовавшиеся ранее, радиочастотные масс-спектрометры (РМС) позволили получить информацию, включающую: 1) точное определение изотопного состава неона; 2) более надежные данные о содержании криптона и ксенона, а также об относительной концентрации нерадиоактивных первичных изотопов аргона; 3) уточненные данные о концентрации всех трех изотопов аргона. (РМС функционировали на высотах от примерно 26 км до поверхности Венеры.)

Осуществленная В. Г. Истоминим и др. [23] предварительная обработка полученных результатов показала, что изотопный состав неона в венерианской атмосфере существенно отличается как от «земного», так и от «солнечного». В согласии с полученными ранее результатами концентрация неона-20 составляет около 7 млн⁻¹ (по объему), а для отношения концентраций найдена

оценка неон-22/неон-21 ≥ 15. Как и ранее, для концентрации азота получено значение около 4 % (по объему), а сумма концентраций трех изотопов аргона составляет примерно 100 млн⁻¹ (содержание аргона-36 равно 50 млн⁻¹). Уточненное значение отношения концентраций аргон-40/аргон-36 = 1,11 ± 0,02. Получено близкое к земному (1,11 · 10⁻²) значение ¹³C/¹²C = 1,08 · 10⁻². Концентрация криптона-84 оказалась равной примерно 23 млрд⁻¹ («Венера-13»)

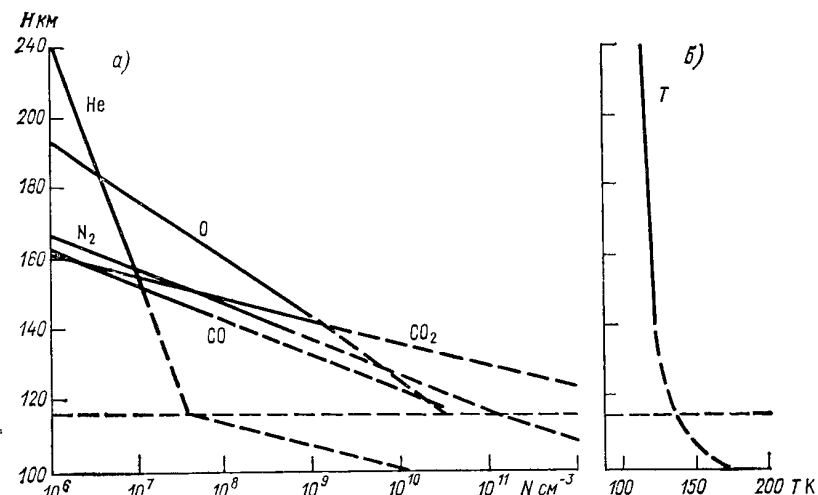


Рис. 3.9. Вертикальные профили концентрации различных газовых компонентов (а) и температуры (б).

Сплошные кривые — данные наблюдений, пунктирные — результат экстраполяции.

и 18 млрд⁻¹ («Венера-14»), что хорошо согласуется с данными АМС «Пионер—Венера». Приближенная оценка суммы концентраций ксенона-131 и -132 привела к возможному интервалу концентраций 0—7 млн⁻¹.

Продолжающиеся около двух десятилетий наблюдения с целью ИК картирования Венеры выявили существование в венерианской атмосфере целого ряда явлений с различными пространственно-временными масштабами, в том числе: солнечно-обусловленные контрасты температуры, изменчивую полосчатую структуру облачности в низких и умеренных широтах, глобально проявляющееся потемнение к краю диска, характеризующиеся высокими температурными контрастами полярные «воротнички». Еще более детальную картину пространственно-временной изменчивости ИК теплового излучения Венеры позволили получить данные наблюдений за период с начала декабря 1978 г. по середину февраля 1979 г. при помощи ИК радиометра (ИКР), установленного на искусственном спутнике Венеры «Пионер—Венера».

Дайнер и др. [95] выполнили совместный анализ результатов наземных и космических наблюдений, который привел к следующим выводам: 1) изменчивость солнечно-обусловленных контрастов ИК излучения характеризуется преобладанием волнового числа, равного 2, а также существенным суточным ходом, причем относительные амплитуды полусуточного и суточного хода изменяются с широтой; 2) учет термически возбужденных температурных волн (или сопровождающих их вертикальных перемещений верхней границы облачного покрова) дает возможность лучше объяснить формирование солнечно-обусловленного ИК излучения, чем температурные контрасты, возникающие в результате вариаций микрофизических свойств аэрозоля; 3) потемнение к краю диска вблизи экватора свидетельствует о том, что верхняя граница основного слоя облачного покрова, является диффузной, а аэрозоль более или менее равномерно перемешан с газом; 4) полярные «воротнички» оказываются устойчивыми на протяжении по крайней мере нескольких месяцев и рассеиваются внезапно; 5) «воротнички» наблюдались одновременно на обоих полюсах, но остается неясным, является ли эта синхронность правилом или исключением. Данные ИКР выявили наличие в зоне «воротничков» необычного вертикального профиля температуры — инверсии в слое между верхней границей облаков (уровень давления больше 100 гПа) и уровнем 80 км. Низкая температура «воротничков» не является следствием их высоко расположенной верхней границы (как считалось ранее), а возникает в результате сильного горизонтального градиента температуры на уровне вершин венерианских облаков.

Выполненная Шпенкухом и др. [72] обработка данных установленного на АМС «Венера-15 и -16» фурье-спектрометра позволила восстановить вертикальный профиль температуры в слое 60—95 км. Полученные результаты свидетельствуют о наличии монотонного понижения температуры с высотой в диапазоне широт $\pm 60^\circ$. В более высоких широтах наблюдается повышение температуры и, как правило, имеет место инверсия или изотермия в слое 10—100 гПа. Не было обнаружено суточного хода температуры.

Наблюдения за торможением АМС «Пионер—Венера-1» (ПВ-1) позволили впервые восстановить параметры атмосферы другой планеты с использованием методики, которая широко применялась для изучения верхней атмосферы Земли и внесла основной вклад в построение модели земной верхней атмосферы. Полученные по торможению ПВ-1 данные о плотности атмосферы и модели состава атмосферы согласуются с результатами измерений вертикального профиля плотности (температура экзосферы принята равной 350 К). Все рассматриваемые результаты наблюдений относятся к точке около $18,4^\circ$ с.ш., диапазону высот 150—190 км и периоду с 7 декабря 1978 г. по 1 января 1979 г.

Вследствие торможения атмосферой время обращения ПВ-1 уменьшалось от $(-0,72 \pm 0,02)$ с до $(-8,32 \pm 0,06)$ с (за один ви-

ток). Хотя влияние таких факторов, как солнечное гравитационное воздействие (около 10^{-1} с/виток) и световое давление (10^{-2} с/виток), мало, оно тем не менее принималось во внимание. Обработка данных выполнена в предположении, что отношения концентраций $O/CO_2 = 0,023$ и $O/CO = 1$, что соответствует значениям на уровне турбопаузы, находящейся на высоте 124 км, где коэффициент турбулентного перемешивания равен 10^7 см²/с. В таком случае концентрации CO_2 , O и CO на высоте 144 км составляют соответственно $3,5 \cdot 10^9$; $1,8 \cdot 10^9$ и $4,7 \cdot 10^8$ см⁻³.

Если принять, что турбопауза расположена на уровне 144 км, концентрации CO_2 , O и CO на этом уровне должны составлять $2,5 \cdot 10^9$; $1,5 \cdot 10^9$ и $1,5 \cdot 10^9$ см⁻³, а коэффициент перемешивания должен превышать 10^9 см²/с ввиду более низкой плотности. Предположение о возможности существования турбопаузы в диапазоне высот 124—144 км согласуется с наблюдаемым профилем плотности лишь в случае, если атомарный кислород является главным компонентом выше 160 км, а отношение концентраций O/CO_2 на высоте 144 км равно 0,5—0,6.

Высокая концентрация атомарного кислорода может приводить к значительному выхолаживанию экзосферы за счет колебательного и вращательного возбуждения CO_2 , что частично объясняет холодную экзосферу, соответствующую модели Дикинсона и Ридли. Поскольку в период с 17 декабря 1978 г. по 1 января 1979 г. эффективная высота измерений располагалась вблизи уровня 155 км (± 4 км), это исключило возможность получения данных о вертикальной структуре атмосферы за указанный период, но позволило исследовать временной ход. Обнаружен резкий спад плотности, приведенной к уровню 155 км, и температуры экзосферы между 22 и 23 декабря, что точно соответствует местному солнечному времени вечернего терминатора. Температура экзосферы упала с примерно 300 К до значений ниже 150 К (среднее значение составило 118 К). Если рассматривать в качестве граничного условия температуру на высоте 115 км, равную 149 К, то становится ясным, что на Венере отсутствует ночная термосфера. Динамические, химические и радиационные процессы на этой планете не в состоянии поддерживать существующий положительный вертикальный градиент температуры выше 115 км после захода Солнца.

Значительное косвенное влияние на ночную верхнюю атмосферу может оказывать солнечная активность. Так, например, резкий спад скорости солнечных протонов с 730 до 300 км/с, происшедший в период 22—25 декабря 1978 г., сопровождался уменьшением плотности на высоте 155 км в 8,7 раза. Обнаружение высокой концентрации атомарного кислорода может означать малую интенсивность вертикального турбулентного перемешивания, откуда следует, что низкая концентрация водорода в венерианской экзосфере является следствием нетепловой диссипации водорода.

Это, в свою очередь, означает возможность сильного уменьшения содержания воды за время геологической эволюции. При сравнении данных о плотности, полученных по торможению ПВ-1, с результатами теоретических расчетов, как правило, обнаруживается завышенность последних. Так, например, значения плотности на высотах 160 и 190 км по модели атмосферы Венеры, разработанной сотрудниками НАСА, соответственно в 4,5 и 3,9 раза превышают наблюдаемые.

Для первого месяца функционирования орбитального аппарата (ОА) АМС «Пионер—Венера-1» характерно быстрое убывание высоты перицентра под влиянием торможения атмосферой в период 7—16 декабря 1978 г., после чего высота стабилизировалась в пределах 149—156 км. Если предполагать экспоненциальное убывание плотности с высотой, то изменение периода обращения ΔP см³/с определяется (с учетом конкретных параметров ОА) простой формулой:

$$\Delta P = -4,6 \cdot 10^3 \rho (H/10)^{1/2} g^{-1},$$

где ρ — плотность атмосферы, H — шкала высот, g — ускорение свободного падения. Данные единичного измерения ΔP позволяют определить лишь $\rho H^{1/2}$ при условии, что введены поправки, исключаяющие влияние возмущений другой природы (помимо торможения атмосферой). Обработка данных в предположении, что $H = 8$ км, позволила восстановить вертикальный профиль плотности на дневной стороне вблизи перицентра, а также проследить временные вариации плотности. Обусловленные главным образом предположением о постоянстве H ошибки определения плотности составляют около 50 %.

Полученные результаты свидетельствуют о непригодности любой стационарной модели атмосферы: наблюдаются сильные изменения плотности со временем. При расположении перицентра на дневной стороне терминатора имеют место циклические вариации плотности с периодом 4—5 сут на высоте 150 км. Средняя плотность составляет в этом случае $1,4 \cdot 10^{-13}$ г/см³, а амплитуда ее изменчивости равна $4 \cdot 10^{-14}$ г/см³. Происходит резкий спад плотности — почти в четыре раза (до среднего значения, равного $4 \cdot 10^{-14}$ г/см³) — при переходе на ночную сторону планеты и усиление относительной изменчивости плотности. Вызывает интерес близкое совпадение 4—5-суточных циклов на дневной стороне с 4-суточной периодичностью циркуляции верхних слоев атмосферы Венеры. Для понимания природы этих периодичностей необходимы дальнейшее накопление данных наблюдений и детальные исследования преобразований энергии в атмосфере. По данным наблюдений за период 1 января—1 апреля 1979 г., обнаружена вертикальная структура ночной термосферы и экзосферы Венеры, которая оказалась согласующейся с предположенной ранее на основе предварительной обработки данных моделью атмосферы (рис. 3.10), характеризующейся температурой ночной экзосферы ниже 150 К. Согласно новым данным (рис. 3.11), температура

ночной экзосферы составляет около 110 К (по данным первоначальных наблюдений на ночной стороне — 118 К). Плотность экзосферы на высоте около 155 км, состоящей главным образом из атомарного кислорода, оказалась примерно в 20 раз меньше ожидаемой согласно модели Дикинсона—Ридли, что может быть обусловлено значительно более низкой температурой термосферы, чем та, которая следует из модели (170—250 К), хотя может су-

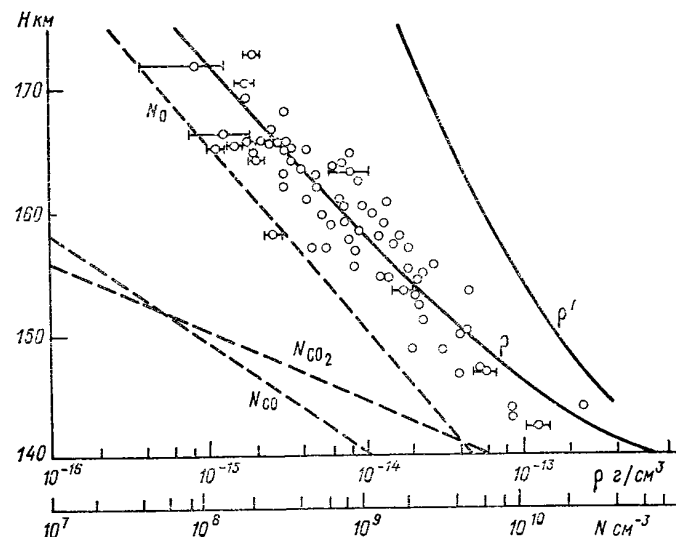


Рис. 3.10. Вертикальные профили суммарной плотности ρ (ρ' — расчетные данные) и концентрации N составляющих атмосферы по данным наблюдений за период с 1 января по 1 апреля 1979 г.

ществовать и другая причина — «кислородный горб» гораздо слабее выражен и находится на меньших высотах, чем это следует из расчетов.

Рассмотрение временной изменчивости плотности атмосферы показало, что наблюдаются следующие закономерности: 1) очень резкое уменьшение плотности от дневной к ночной стороне, противоречащее расчетным данным, которые предсказывают «кислородный горб» (спад плотности может быть обусловлен неожиданно слабым переносом через вечерний терминатор или очень сильным стоком тепла на ночной стороне); 2) наличие периодических вариаций плотности большой амплитуды в экзосфере с периодом 5—6 сут; 3) существование пятисуточных температурных волн в стратосфере, интерпретируемых как волны планетарного масштаба, которые могут распространяться вверх и порождать

осцилляции в термосфере и экзосфере (амплитуда температурных волн составляет 1, 3 и 40 К на высотах соответственно 70, 50 и 155 км — рис. 3.12 и 3.13); 4) значительная асимметрия суточных вариаций относительно полуночи (минимальная температура имеет место на утренней стороне).

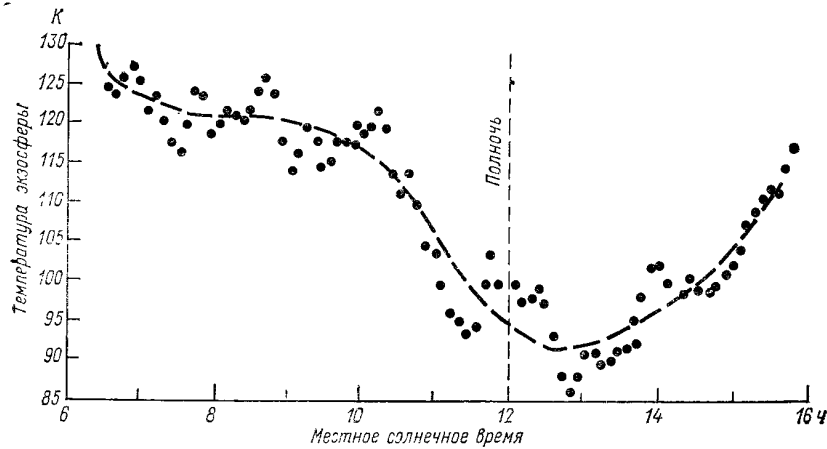


Рис. 3.11. Суточный ход температуры экзосферы (скользящие средние за 11 сут).

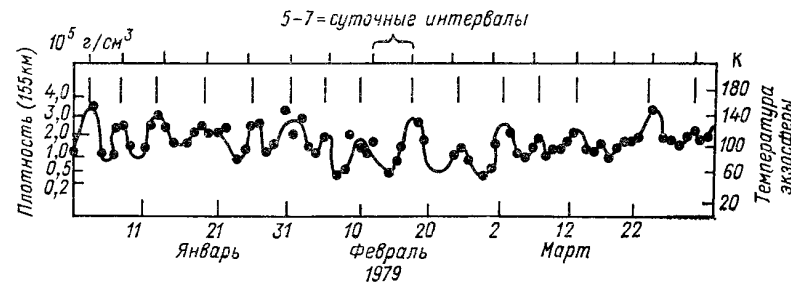


Рис. 3.12. Плотность атмосферы ночью, приведенная к высоте 155 км.

Возможно, упомянутые температурные волны возникают под влиянием возмущений, которые перемещаются вместе со стратосферой (заметим, что факт существования подобных волн требует подтверждения). Важное значение имеет то, что период волн превосходит период, наблюдаемый по перемещению УФ контрастов верхней границы облачного покрова (примерно 4 сут). Не исключено, что волны возникают в более глубоких и более медленно вращающихся слоях атмосферы, чем те, в которых формируются УФ неоднородности. Если считать, что атмосфера вращается в направлении вращения планеты, то следует ожидать минимальной температуры экзосферы в ранние утренние часы, как

это имеет место на Земле. Подобное земному сверхвращению термосферы и экзосферы может качественно объяснить наличие пятишестисуточных осцилляций и отсутствие значительного «кислородного горба».

При решении навигационных задач, связанных с функционированием АМС, детализированные модели состава и строения вене-

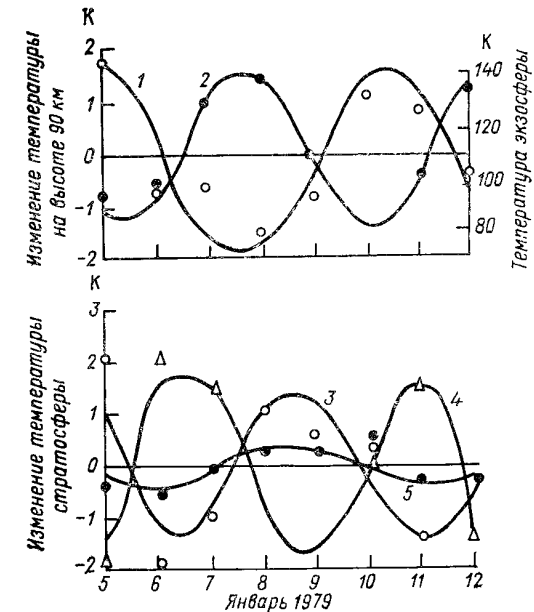


Рис. 3.13. Температурные волны на различных высотах в верхней атмосфере Венеры.

1 — 90 км, 2 — экзосфера (около 155 км), 3 — верхняя граница облаков, 4 — 60 км, 5 — 70 км.

рианской атмосферы оказываются излишне громоздкими. Для обоснования более простой и компактной модели верхней атмосферы Биркеланд и др. [78] предприняли обработку результатов траекторных измерений за примерно 600 проходов АМС «Пионер—Венера» через атмосферу планеты, которые были равномерно распределены вокруг планеты относительно центра на широте около 17° с.ш. Высота орбиты АМС вблизи перигея варьировала в пределах 145—200 км. Значения торможения, исходные для восстановления плотности атмосферы, определялись по разности периода оскуляции в апоцентре двух последовательных витков с учетом влияния солнечного давления и эффектов третьего тела.

Полученные в работе [78] результаты свидетельствуют о возможности обоснования простой статистической экспоненциальной

модели строения венерианской атмосферы, которая вполне достоверно воспроизводит такие наиболее существенные закономерности, как, например, суточное «вздутие» атмосферы, слоистость структуры, а также выявляет и некоторые более тонкие детали. Имеется, однако, несколько районов, где достоверность модели ухудшается ввиду значительной изменчивости параметров атмосферы со временем. Изменения состава атмосферы с высотой охарактеризованы на основе использования двухслойной модели.

С декабря 1978 г., когда АМС «Пионер—Венера» была выведена на почти полярную 24-часовую орбиту искусственного спутника Венеры с апоцентром около 12 венерианских радиусов и первоначальным перицентром 140 км, производились, в частности, наблюдения верхней атмосферы и ионосферы планеты, одна из главных целей которых состояла в изучении взаимодействия солнечного ветра с атмосферой при отсутствии магнитного поля у планеты [84]. Подобным наблюдениям благоприятствовало наличие постепенного увеличения высоты перицентра орбиты (ВПО) под воздействием гравитационного поля Солнца, которая в течение первых 2,5 венерианских лет (каждый из них эквивалентен 224 земным суткам) поддерживалась на первоначальном уровне при помощи бортовых реактивных двигателей. К весне 1984 г. ВПО достигла 1900 км, а к лету 1986 г. должна была возрасти до 2240 км, после чего (к 1992 г.) снизиться, если не будет выполнено маневров АМС. Положение точки перицентра перемещалось от 17° с.ш. к 11° ю.ш. Эволюция параметров орбиты открыла возможности определения конфигурации и временной изменчивости фронта ударной волны перед планетой, а также ионопаузы, которые стали благоприятными в 1986 г. (год минимума 11-летнего цикла), когда АМС регулярно пересекала фронт ударной волны вблизи перицентра.

Существует общепринятая точка зрения на главный слой венерианской ионосферы как контролируемый фотохимическими процессами и представляющий собой аналог чепменова слоя. Последнее означает, что высота максимума и значения электронной концентрации зависят от зенитного угла Солнца θ_0 . Согласно данным радиорефракционных наблюдений, которые составляют основной источник информации об ионосфере в рассматриваемом интервале высот, максимальная электронная концентрация действительно следует подобной закономерности, но для высоты максимума наблюдаются значительные отклонения от чепменова значения.

Бауэр [76] получил аналитические представления для двух обсуждаемых параметров в зависимости от θ_0 , которые позволяют учесть также суточный ход шкалы высот (температуры), обеспечивая более реалистическое описание данных наблюдений. Вследствие большой продолжительности венерианского дня, происходит обусловленная солнечной активностью (27-суточной периодичностью вращения Солнца) модуляция суточного хода концентрации заряженных частиц. Такого рода периодическую модуляцию

можно учесть, вводя аналитически аппроксимированную зависимость от 10,7-см потока радиоизлучения Солнца как индикатора изменчивости УФ радиации, ответственной за ионизацию и разогревание верхней атмосферы Венеры. Солнце влияет на венерианскую ионосферу в некоторой степени также через взаимодействие с солнечным ветром. Поэтому конфигурация ионопаузы обладает зависимостью от θ_0 , которая маскируется, однако, изменчивостью обусловленного солнечным ветром давления. Рассматриваемая аналитическая аппроксимация воздействия Солнца на венерианскую ионосферу может быть использована для построения моделей стандартной атмосферы Венеры.

Как уже отмечалось, на четырех спускаемых аппаратах АМС «Пионер—Венера»: БСА, САД, САН и САС установлены датчики температуры и давления, а также акселерометры для измерений ниже верхней границы облаков. Над облаками функционировали лишь акселерометры, и структурные параметры определялись только по торможению СА. По неустановленным причинам функционирование датчиков температуры на всех четырех СА прекратилось при достижении уровня с температурой 640 К, что соответствует высоте 12—14 км. Значения температуры ниже этого уровня получены путем экстраполяции с использованием барометрической формулы. Ошибка определения температуры у поверхности Венеры, по-видимому, не превышает 5 К. Средняя погрешность привязки по высоте составляет около 1 % (т.е. примерно 0,5 км на высоте 50 км).

В табл. 3.3 приведены данные об атмосферном давлении и температуре у поверхности планеты. Разница в давлении обусловлена

Таблица 3.3
Атмосферное давление и температура у поверхности
Венеры по данным СА «Пионер—Венера»

СА	Давление, 10^5 Па	Температура, К	Высота (относительно уровня БСА), км
БСА	90,3	731	0,0
САС	86,2	721	0,73
САД	91,5	729	—0,21
САН	94,5	732	—0,72

влиянием рельефа. Результаты зондирования атмосферы хорошо согласуются с данными «Венеры-8» ниже 25 км. Однако выше этого уровня наблюдаются расхождения, достигающие 30 К на высоте 45 км. Хотя эти расхождения невелики, они имеют очень важное значение. Согласно данным СА «Пионер—Венера», вертикальный градиент температуры в слое выше 15 км соответствует условиям устойчивой стратификации, тогда как по данным «Ве-

неры-8» можно сделать вывод о конвективной неустойчивости атмосферы на высотах меньше 35 км.

Устойчивость стратификации отображает почти адиабатическое состояние атмосферы, поддерживаемое общей циркуляцией, а не конвективным перемешиванием. Влияние общей циркуляции атмосферы должно поддерживать вертикальный градиент температуры несколько меньше адиабатического. Градиент, очень близкий к адиабатическому, наблюдается на высотах меньше 20 км. Выше 40 км происходит постепенный переход от почти адиабатического профиля температуры к профилю, характерному для условий лучистого равновесия.

В связи с существованием в мощной венерианской атмосфере сильной рефракции света В. С. Авдуский и др. [6] получили оценки рефракции в приповерхностном слое атмосферы, основанные на использовании точного и приближенного (погрешность 10') методов расчета зенитного расстояния видимого горизонта на Венере по панорамам, зарегистрированным при помощи посадочного аппарата АМС «Венера-13». Вычисленные значения зенитного расстояния видимого горизонта варьируют в пределах $89^{\circ}30' - 89^{\circ}55'$. Поскольку положение горизонта на панорамах для аномальной и сверхрефракции должно отличаться на 2—7 элементов разрешения, возможно распознавание условий рефракции по панорамам. Указанные значения зенитного расстояния не противоречат существованию сверхрефракции в видимой области спектра и адиабатической стратификации припланетного слоя атмосферы. При таких условиях для наблюдателя, находящегося на поверхности Венеры, горизонт кажется несколько приподнятым. Приближенность расчетов и погрешности обработки панорам не позволяют пока оценить возможные отклонения от адиабатической стратификации.

Оптически плотные облака располагаются в слое 47,5—49 км при температуре 350—365 К (ниже точки кипения воды) и давлении $(1,0 \dots 1,3) \cdot 10^5$ Па. Над облачным покровом (50—54 км) возникает область слабой неустойчивости, откуда следует, что поглощенная плотным облаком солнечная радиация, по-видимому, стимулирует конвекцию над поглощающим слоем. Сопоставление данных зондирования в различных точках подтверждает сделанные ранее выводы о малости горизонтальных контрастов температуры. Ниже 50 км контрасты температуры не превышают нескольких градусов при несколько более высокой температуре вблизи 30° в южном полушарии, чем около 5° и 60° в северном полушарии.

По-видимому, температура возрастает с широтой до определенной широты, а затем начинает убывать в направлении к полюсам, что согласуется с предложенной Янгом и Поллаком моделью общей циркуляции венерианской атмосферы. В этом случае, в согласии с данными «Маринера-10», должно происходить усиление средней зональной скорости с широтой до широты около 45° и последующее ее уменьшение до нуля у полюсов. Температура прак-

тически выравнивается при давлении больше $30 \cdot 10^5$ Па вследствие большой тепловой инерции нижних слоев атмосферы.

Несомненно также, что мощным механизмом выравнивания меридионального градиента температуры является обусловленный атмосферной циркуляцией перенос тепла между экватором и полюсом. Полученные лишь по данным САС сведения о температуре на больших высотах указывают на практическую изотермичность ($175 - 180$ К) слоя 95—105 км. Профиль температуры на высотах 60—70 км характеризуется наличием слабой волнообразной структуры, которая является, возможно, результатом влияния тепловых приливов (важно также, что этот слой, по-видимому, охвачен четырьмя суточной циркуляцией).

Тэйлор и др. [191—200] рассмотрели результаты обработки части информации, содержащей около 800 000 вертикальных профилей температуры и сведения о непрозрачности облаков, полученные по данным измерений при помощи установленного на ИСВ «Пионер—Венера» многоканального инфракрасного радиометра (МИКР), который функционировал в двух режимах: 1) спектральных измерений уходящего излучения в надире; 2) сканирования лимба. Рассматриваемая информация характеризует трехмерную структуру полей температуры и облачности, а также особенности динамики атмосферы на высотах 60—130 км. Получен вертикальный градиент температуры в слое 65—85 км, равный 3,5 К/км, что хорошо согласуется со средним значением (3,9 К/км), найденным по радиорефракционным данным АМС «Венера-9 и -10». Слой 95—105 км оказался почти изотермическим. Выше 105 км на ночной стороне зарегистрировано убывание яркости температуры (определяемой в предположении, что излучательная способность равна единице) до значений около 200 К (в этом случае необходимо, однако, иметь в виду возможность нарушения локального термодинамического равновесия и, следовательно, трудность интерпретации температуры как кинетической).

При обработке данных измерений для лимба у перигея орбиты ИСВ обнаружен перегиб вертикального профиля температуры вблизи уровня 72 км и наличие полупрозрачных (в ИК диапазоне) облаков, достигающих высоты около 80 км. Последнее согласуется со значением оптической плотности на длине волны 11,5 км по данным измерений для надир, равным единице на высоте 68 км, если принять шкалу высот около 2 км. Гораздо более сильное потемнение к краю диска по данным для 45-мкм канала на дневной стороне, чем на ночной стороне, свидетельствует о существовании значительного суточного хода непрозрачности в далекой ИК области спектра в верхней части слоя облачности и над ним. Это может быть обусловлено вариациями влажности атмосферы.

При анализе карт радиационной температуры для различных слоев атмосферы, как правило, выявляется усиление контрастов

с высотой. Так, например, согласно построенным по данным для 4-го и 33-го витков картам (рис. 3.14), характеризующим поле температуры 20-километрового слоя атмосферы на высоте 100 км, обнаруживается, что дневная сторона на 15—20 К теплее ночной. Суточный ход температуры заметен и на меньших высотах. Значения зонально осредненных контрастов температуры день—ночь резко возрастают выше 90 км. В зоне широт больше 60° с.ш. суточный ход выражен слабо. В нижней части надоблачной атмосферы обнаружено неожиданное повышение температуры от экватора к полюсу, которое отсутствует на высоте 100 км (рис. 3.15). Карты полей температуры, построенные по данным для других витков, позволяют выявить мелкомасштабный суточный ход с амплитудой 5—10 К, который может быть отчасти обусловлен планетарными волнами.

Расчет поля ветра по зонально осредненному полю температуры показал (рис. 3.16), что преобладающий в рассматриваемом слое атмосферы положительный градиент температуры экватор — полюс обуславливает средний зональный ветер, скорость которого быстро уменьшается от примерно 100 м/с на уровне верхней границы облаков (четырёхсуточная циркуляция) до почти нулевой вблизи 80 км. Определяющее такой профиль зонального ветра уменьшение циклострофических сил с высотой компенсируется возрастанием адвективного и вязкого членов в уравнениях движения, что приводит к усилению меридионального компонента ветра до 60 м/с выше 80 км.

При анализе построенных по данным МИКР изображений Венеры выявлены неожиданные структурные особенности вблизи верхней границы облаков в полярной зоне. На изображении, относящемся к 11 февраля 1979 г. (69-й виток), вокруг северного полюса обнаруживаются полосы высоких холодных облаков с включенными в них спиральными «нитями», которые образуют «воротничок» на широте около 65° с.ш. Эта структура, по-видимому, связана с положением Солнца; ее максимальная ширина составляет 2000 км. Облака полярного «воротничка», как правило, оптически плотные и достигают высоты 75 км. В пределах «воротничка» наблюдаются две очень яркие зоны ИК излучения (два «глаза») по обе стороны от полюса, образующие «дипольную» структуру, которая совершает обратное вращение вокруг полюса с периодом около 2,7 сут, хорошо соответствующим наблюдаемому периоду вращения мелкомасштабных УФ контрастов, найденному на основе анализа изображений в высоких широтах с «Маринера-10».

Яркая температура в зоне «глаз» на длине волны 11,5 мкм достигает 260 К — самого высокого значения, зарегистрированного на этой длине волны. По-видимому, «глаза» соответствуют понижениям или разрывам верхней границы главного слоя облачности. На некоторых изображениях оба «глаза» соединены S-образной «нитью», проходящей через центр вращения. Объяснения описанной структуры пока не найдено, но понятно, что структуру облач-

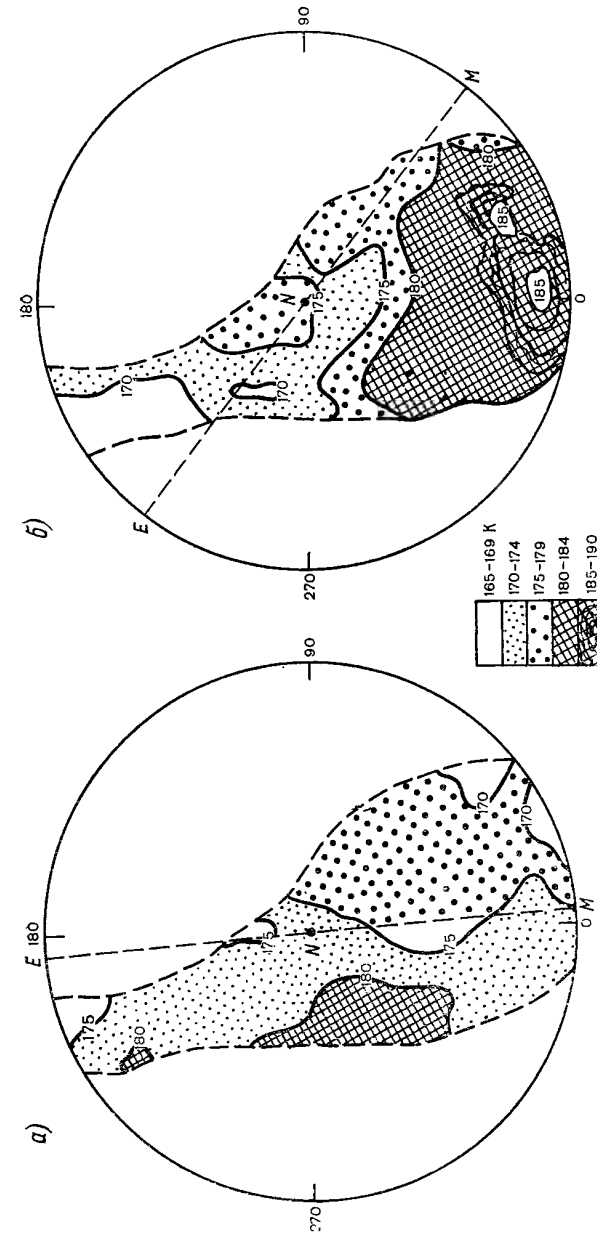


Рис. 3.14. Карты радиационной температуры по данным радиометра с модуляцией давления для 4-го (а) и 33-го (б) витков.

ности в районе полюса нельзя описать как простую вихреобразную систему. Эта система осложнена по меньшей мере наложением планетарных волн (волновое число равно 2) типа наблюдаемых в земной стратосфере приливных волн и волн Кельвина. Данные для каналов 0,4—5,0 и 2,0 мкм свидетельствуют о наличии тонкой надоблачной дымки, окружающей всю планету.

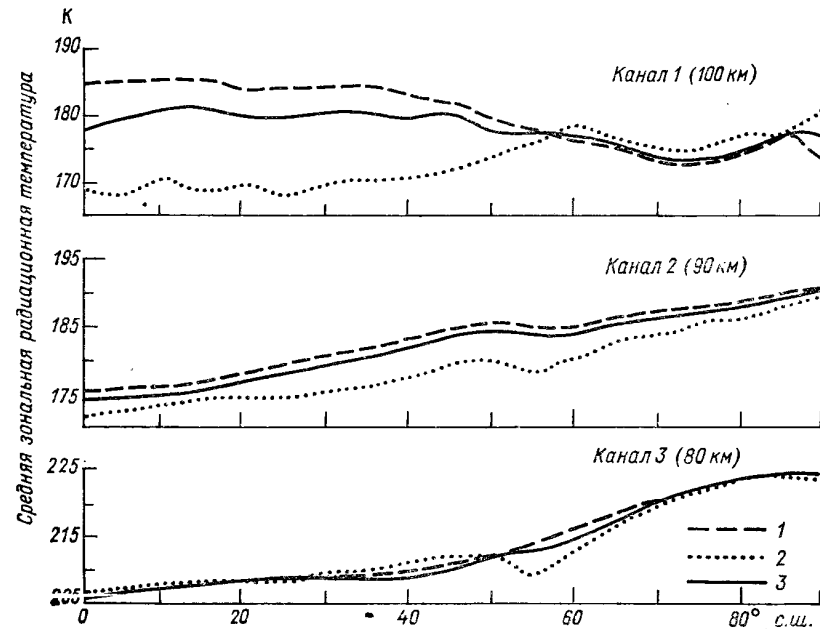


Рис. 3.15. Меридиональные профили среднезональной радиационной температуры для различных каналов радиометра.

1 — средние за дневное время, 2 — средние за ночное время, 3 — средние за сутки.

Одним из неожиданных результатов исследования Венеры явилось обнаружение аномально низкой температуры термосферы (100—130 К) на ночной стороне планеты. В связи с этим Б. Ф. Гордиец и Ю. Н. Куликов [109] на основе рассмотрения одномерной модели теплового баланса термосферы с учетом теплопроводности, радиационного выхолаживания за счет 15-мкм полосы CO_2 , прогревания и выхолаживания, обусловленного влиянием глобального поля ветра, турбулентности, ИК выхолаживания за счет вращательных полос H_2O и CO , а также 63-мкм линии атомарного кислорода, проанализировали возможные механизмы выхолаживания термосферы на ночной стороне планеты. Расчеты показали, что доминирующий вклад в формирование выхолаживания вносит турбулентное перемешивание. В работе [109] получены оценки значений коэффициента перемешивания и динамического числа Ричардсона, обеспечивающих согласие вычисленной и наблюден-

ной температуры термосферы. При слабой турбулентности определяющим фактором теплового баланса термосферы становится ра-

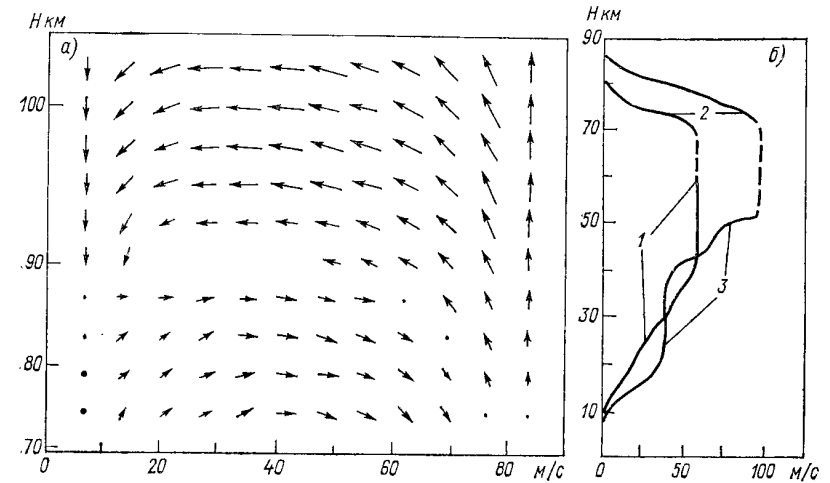


Рис. 3.16. Средняя меридиональная циркуляция, вычисленная по полю температуры (а), и вертикальные профили зонального компонента ветра (б).

1 — «Венера-9», 2 — «Пионер—Венера», 3 — «Венера-8». Самая длинная вертикальная стрелка (рис. 3.16 а) соответствует 30 м/с, горизонтальная стрелка — 60 м/с.

диационное выхолаживание (главным образом за счет вращательных полос водяного пара, если его отношение смеси достаточно велико — превосходит $3 \cdot 10^{-6}$).

Облака и радиационный режим в атмосфере Венеры

4.1. Общие особенности облачного покрова

Существующий с давних пор интерес к исследованиям венерианских облаков обусловлен различными причинами, но главной из них является стремление установить природу формирования глобального однородного облачного покрова, который оставял для оптических методов лишь возможности изучения надоблачного слоя атмосферы. Раскрытие закономерностей формирования облаков Венеры требует определения их химического состава, микроструктуры, вертикальной макроструктуры, изучения особенностей атмосферной циркуляции и других факторов. Все эти проблемы привлекают в настоящее время счень большое внимание [17, 24, 27, 30—34, 36—42, 60—62, 65, 88, 89, 97].

Видимый облачный покров Венеры обладает свойствами, делающими его сходным с земными дымками, формирующимися у земной поверхности под сильным влиянием антропогенных факторов, или со стратосферным аэрозольным слоем Юнге, который располагается вблизи уровня 50 гПа при температуре, близко соответствующей наблюдаемой в верхней части венерианских облаков (Кнолленберг и др. [122, 123]). Облака являются очень разреженными, но устойчивыми. Масса вертикального столба облака эквивалентна только 1 мм осадков, и это указывает на малую вероятность выпадения осадков.

Средняя водность облаков (ВО) составляет $0,5 \text{ г/м}^3$, а максимальная достигает 1 г/м^3 [86]. Поскольку температура в слое облаков равна 365 К, а атмосферное давление — $1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$, становится ясно, что характеристики и условия существования венерианских и земных облаков сходны (водность земных облаков варьирует в пределах $0,3—2,0 \text{ г/м}^3$). Хотя по данным АМС «Пионер—Венера» ВО оказалась примерно в три раза более низкой ($0,1—0,2 \text{ г/м}^3$), вся совокупность имеющихся данных побуждает изучить возможность осадков на Венере, тем более, что обнаружена хорошая корреляция между результатами радиорефракционных измерений и нефелометрических наблюдений нижнего слоя облачности с СА «Венера-9 и -10».

Нефелометрические наблюдения привели к гораздо меньшим значениям ВО (порядка 10^{-2} г/м^3), но этот результат следует приписать нечувствительности показаний нефелометра к крупным каплям, которые определяют основной вклад в ВО. По той же причине нефелометры на СА «Венеры-9 и -10» зарегистрировали резкое уменьшение сигнала на уровне максимума ВО и радиорефракционным данным. Прямые измерения микроструктуры облаков с СА «Пионер—Венера» дали значения радиуса капель до 35 мкм. Зарегистрированное газовым хроматографом на СА значительное возрастание содержания водяного пара под облаками

свидетельствует о возможности наличия испаряющихся серно-кислотных капель (дождя).

Чимино и Элачи [86] проанализировали условия роста капель в венерианских облаках с учетом полученных по данным АМС «Венера» сведений о вертикальных движениях (ниже 44 км наблюдались восходящие потоки до $1,5 \text{ м/с}$) и турбулентности в слое облачности 44—50 км. Предполагается, что капли облаков состоят из концентрированного (85 %-ного) водного раствора серной кислоты, ВО равна 1 г/м^3 , скорость восходящих движений составляет 1 м/с ; вертикальные профили температуры и давления взяты по данным «Маринера-10».

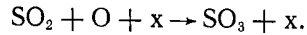
Рост капель в облаках определяется сложными процессами конденсации и коагуляции. Важную роль в процессе конденсации играют ядра конденсации, которыми в атмосфере Венеры являются, по-видимому, частицы серы, имеющие фотохимическое происхождение. Принято, что первоначальное образование и рост капель обусловлены гетеромолекулярной конденсацией с участием двух или более компонентов, претерпевающих переход из газообразной в жидкую или твердую фазу. Капли достигают критического радиуса (когда начинает доминировать влияние коагуляции на их дальнейший рост) за время от 1 до 12 ч (в зависимости от концентрации серной кислоты). Значение критического радиуса в земных условиях составляет около 20 мкм, а на Венере увеличивается до 80 мкм. Предполагается, что, как и на Земле, эффективность столкновения равна единице (каждое столкновение приводит к слиянию капель). Время роста капель до размера дождевых изменяется от 30 мин (для минимального радиуса 150 мкм, при достижении которого капли могут выпадать в виде осадков) до нескольких часов в зависимости от того, как долго капли могут находиться во взвешенном состоянии в восходящем потоке воздуха.

Рост облачных капель на Венере лишь несколько медленнее (примерно в 1,4 раза), чем на Земле в сходных условиях и в облаках с такой же водностью. Это объясняется меньшей силой тяжести и меньшей плотностью капель в условиях Венеры. Естественно, что выпадающие из венерианских облаков осадки испаряются на определенной высоте в атмосфере, где температура становится достаточно высокой. Расчеты показывают, например, что падение капель радиусом 80 мкм продолжается на протяжении 12 км (слой 50—38 км). Таким образом, толщина слоя осадков на Венере более чем вдвое превосходит толщину слоя осадков на Земле. Подобная зона осадков может быть обнаружена по данных наземных наблюдений с использованием методов активной или пассивной радиолокации. В работе [155] получена оценка возможностей обнаружения осадков при помощи радиотелескопа в Голдстоуне на длине волны 3,5 см, из которых вытекает реальность распознавания зоны осадков площадью не менее $750 \times$

× 250 км. Если интенсивность осадков достигает 10 мм/ч (средней силы шторм на Земле), то линейный размер зоны осадков может быть в 10 раз меньше (75 км). Значительно лучшей пространственной разрешающей способностью можно достичь при помощи радиолокатора или микроволнового радиометра, установленного на искусственном спутнике Венеры.

В отличие от слоя Юнге, оптическая плотность которого очень мала (0,01—0,05), оптическая плотность венерианских облаков достигает 20—55. Сопоставление данных измерений яркости и поляризации облаков с результатами теоретических расчетов для различных моделей облаков привело к выводу, что наилучшее согласование с наблюдениями имеет место, если предположить, что частицы облаков являются сферическими, имеют показатель преломления $1,44 \pm 0,01$ и эффективный радиус 1,05 мкм при очень малой изменчивости размеров частиц. Атмосферное давление на уровне оптической плотности, равной единице, составляет 50 гПа; счетная концентрация частиц на этом уровне — около 30 см^{-3} . Существенно, что отмеченная микроструктура облаков оставалась практически неизменной на протяжении нескольких лет наблюдений, откуда вытекает, в частности, что размеры частиц слабо изменяются в зависимости от времени года.

Наблюдаемые оптические свойства облаков наилучшим образом описываются, если считать, что облака состоят из капель концентрированного водного раствора серной кислоты. По-видимому, как на Земле, так и на Венере молекулы серной кислоты образуются в результате реакции между H_2O и SO_3 , причем SO_3 возникает по реакции:



Аналогичен и процесс формирования капель серной кислоты в результате процесса гетеромолекулярной нуклеации с участием водяного пара и SO_3 , который приводит к появлению первичных частиц из гидратов (до $\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) и их последующей коагуляции. Образование капель раствора серной кислоты зависит от парциального давления водяного пара и начинается при размерах частиц примерно 0,1 мкм, если относительная влажность составляет 1 % при температуре 0 °C. По-видимому, частицы не образуются у нижней границы облака, как это происходит в земных облаках.

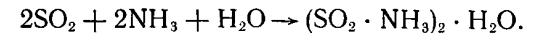
С тех пор как был обнаружен преимущественно сернокислотный состав облаков Венеры, стало ясным ключевое значение понимания химии серы в венерианской атмосфере для объяснения происхождения ее облачного покрова. Выполненные ранее измерения показали, что концентрация сернистого газа — главного содержащего серу соединения — почти постоянна в нижней атмосфере, но спадает до нескольких млн^{-1} на высотах 40—60 км. Для определения возможных пределов изменения концентрации SO_2 на различных высотах 17—20 декабря 1980 г. в радиоастрономической обсерватории Хэт Трик (США) Гуд и Шлоерб [103] выполнили

радиоинтерферометрические наблюдения распределения радиотеплового излучения по диску Венеры на длине волны 3,4 мм (87,24 ГГц). Индикатором содержания сернистого газа служит спад интенсивности излучения (потемнение) к краю диска планеты. Поскольку непосредственно измеряемой при помощи двухэлементного интерферометра величиной является фурье-преобразование распределения интенсивности излучения, то характеристикой потемнения является положение точки обращения этой величины в нуль (нулевое пересечение).

Полученные в работе [103] результаты свидетельствуют о том, что высокая концентрация SO_2 может распространяться не выше 42 км. В качестве верхнего предела концентрации SO_2 можно принять постоянное значение отношения смеси, равное 180 млн^{-1} , до высоты 42 км; затем происходит экспоненциальный спад до $0,1 \text{ млн}^{-1}$ на высоте 70 км. Такому профилю соответствует радиояростная температура всего диска Венеры на длине волны 3,4 мм, составляющая 352,4 К, которая лишь на 2,5 % ниже температуры чисто углекислой атмосферы. Последнее подтверждает возможность использования Венеры как калибровочного источника радиотеплового излучения.

Как отметил Д. В. Титов [70], наиболее вероятны три механизма образования частиц аэрозоля в планетарной атмосфере: 1) концентрация одного из газовых компонентов при достижении соответствующих физических условий в среде (например, образование земных водных облаков при пересыщении воздуха водяным паром); 2) фотохимические газофазные реакции, приводящие к образованию жидких и твердых частиц (стратосферный сернокислотный и смоговый аэрозоль на Земле); 3) химические реакции с появлением нового низколетучего при данных условиях вещества. В условиях Венеры первый из упомянутых механизмов не может функционировать вообще, поскольку ни для одного из обнаруженных газов не достигаются условия пересыщения, а фотохимический механизм ограничен высотами более 60 км ввиду сильного ослабления УФ радиации атмосферой.

В работе [8] выполнен анализ термодинамики реакции взаимодействия трех веществ в газообразном состоянии ($t < 15^\circ\text{C}$):

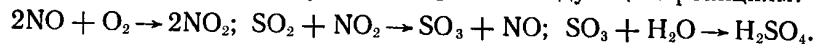


Из этого анализа следует возможность образования аэрозоля пирсульфата аммония $(\text{NH}_4)_2 \text{S}_2\text{O}_5$ на высотах 58—70 км при концентрации аммиака меньше 10 млн^{-1} , которая вполне реальна. Ниже 58 км необходим уровень концентрации 100—1000 млн^{-1} , что существенно превосходит возможные верхние пределы (вероятно, именно этим обусловлено резкое уменьшение числа частиц первой моды на высотах меньше 58 км). Формирование частиц сульфата аммония $(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_3$ возможно лишь при концентрации аммиака более 1000 млн^{-1} , которую нельзя считать реальной. Наличие силь-

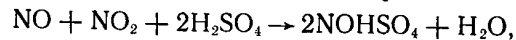
ной температурной зависимости упомянутой реакции определяет более благоприятные условия образования пирсульфата аммония на ночной стороне Венеры, где, кроме того, имеет место и более высокая концентрация сернистого газа (ввиду отсутствия его фотохимического разрушения).

Рассмотрение оптических свойств пирсульфата аммония и отождествление его с первой модой частиц аэрозоля в верхнем слое облачного покрова позволяет объяснить УФ поглощение в венерианской атмосфере и удовлетворительно описывает спектральную зависимость сферического альбеда планеты. По-видимому, существует два механизма формирования контрастов яркости облачности в УФ области спектра: воздействие надоблачной дымки и рост количества поглотителя в слое облачности, причем второй механизм, вероятно, более эффективен (во всяком случае в интервале длин волн 0,32—0,38 мкм). Полученные по данным АМС «Венера-13» и «Венера-14» сведения о концентрациях H_2S ($80 \text{ млн}^{-1} \pm 40 \text{ млн}^{-1}$), COS ($40 \text{ млн}^{-1} \pm 20 \text{ млн}^{-1}$) и обнаружение HCl определяют необходимость анализа возможности механизма образования аэрозоля в смесях газов COS , H_2S , HCl , SO_2 и NH_3 , который может оказаться весьма эффективным в условиях Венеры.

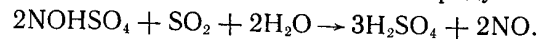
Как отметил Силл [185], наилучшим объяснением состава и пространственной структуры венерианских облаков, полученных по данным СА «Венера» и «Пионер—Венера», служит аналогия с процессами в «свинцовой» (выложенной свинцом) камере, которая широко применялась в XIX—XX вв. для производства серной кислоты. В этом случае осуществляется окисление SO_2 до H_2SO_4 посредством NO_x в присутствии H_2O по следующим реакциям:



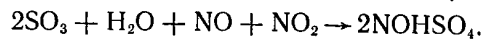
Как видно, в ходе этого процесса происходит восстановление окиси азота. Конечным результатом процесса в цепочке свинцовых камер является образование белой дымки из капель серной кислоты, а исходными продуктами являются теплый (70°C) сернистый газ, воздух, водяной пар и окислы азота (окись или двуокись азота). Стоящая на выходе технологической цепочки башня Гей-Люссака обеспечивает сохранение окислов азота по реакции:



которая приводит к образованию более разведенной серной кислоты и растворенной в ней нитрозилсерной кислоты (нитрозы). Последняя поступает в находящуюся в начале цикла башню Гловера, где происходит смешение исходных продуктов и реакция



Если, однако, в башню Гловера подается недостаточно пара, то может происходить образование кристаллов нитрозы по реакции:



Лабораторные измерения показали, что учет наличия раствора нитрозы в серной кислоте, сернистого газа и двуокиси азота позволяет объяснить наблюдаемый спектр отражения Венеры в ультрафиолетовом и видимом диапазонах, а кристаллы нитрозы являются компонентами нижнего и среднего слоев облачного покрова.

Данные измерений в подоблачной атмосфере Венеры при помощи газовых хроматографов, установленных на АМС «Венера-11, -12» (ГХВ) и «Пионер—Венера» (ГХП), попадают в диапазон отношения смеси сернистого газа на высоте 22 км, составляющий $100\text{—}200 \text{ млн}^{-1}$. По данным ГХП, концентрация O_2 в слое 42—52 км равна $16\text{—}44 \text{ млн}^{-1}$. Отношение смеси H_2O по данным ГХП (5190 млн^{-1} на высоте 42 км и 1350 млн^{-1} на высоте 22 км) значительно превосходит полученное по данным ГХВ ($2\text{—}200 \text{ млн}^{-1}$), но укладывается в диапазон $1000\text{—}10\,000 \text{ млн}^{-1}$, соответствующий более ранним данным — АМС «Венера-4, -5, -6». Поскольку возможность столь высоких значений отношения смеси H_2O подвергалась сомнениям, Крэйг и др. [91] предприняли анализ этих значений для определения их соответствия условиям термодинамического равновесия, существующим в нижних слоях венерианской атмосферы. Рассмотрение различных вариантов состава атмосферы привело к выводу, что, если считать правильными данные ГХП о концентрации O_2 и SO_2 , то корректным является лишь отношение смеси H_2O , полученное по данным ГХВ («Венера-11»). В таком случае оказывается вероятной высокая концентрация серного ангидрида SO_3 , которая, однако, трудно согласуется с составом атмосферы у верхней границы облачного покрова и над облаками. Необходимы поэтому дальнейшие комплексные измерения состава нижних слоев атмосферы Венеры.

Основным источником информации о горизонтальной структуре облаков Венеры являются фотографии планеты в ультрафиолетовом участке спектра, где наблюдаются значительные контрасты яркости. Первые важные материалы такого рода принесли запуск АМС «Маринер-10». В настоящее время накоплены изображения Венеры в ультрафиолетовых длинах волн за длительное время, что открывает возможности детального анализа структуры, интенсивности движений и эволюции «ультрафиолетовых» неоднородностей за этот период, а также оценки репрезентативности той картины атмосферных движений, которая получена по данным АМС «Маринер-10» за восемь суток. Эти данные обнаружили наличие трех V-образных неоднородностей, расстояние между которыми по долготе составляет 120° , а расположение симметрично относительно экватора [96]. Все три неоднородности перемещаются вдоль экватора на запад со средней скоростью 110 м/с . Область южного полюса покрыта ярким облаком, распространяющимся до 50° ю. ш. По-видимому, аналогичная картина имеет место и в районе северного полюса.

Дольфус [96] выполнил детальный анализ всех имеющихся фотографий Венеры в ультрафиолетовом свете, в том числе полученных в результате организованных Международным астрономическим союзом данных координированных наблюдений на нескольких обсерваториях. Оказалось, что данные «Маринера-10» хорошо согласуются с результатами многолетних наземных наблюдений неоднородностей в УФ области спектра (исключение составляют яркие полярные зоны облачности, которые не являются устойчивыми). Как правило, хорошо идентифицируются вытянутые вдоль экватора V-, Y- и Ψ-образные неоднородности, которые перемещаются на запад (по направлению вращения планеты) со скоростью около 110 м/с. Наиболее устойчивые V-образные неоднородности наблюдаются в течение нескольких недель. Мелкомасштабные структуры облачности обычно значительно изменяются после каждого четырехсуточного периода обращения вокруг планеты.

Контраст яркости в ультрафиолетовом свете составляет в среднем 32 %, но может варьировать в пределах 0—37 %. В редких случаях можно наблюдать контрасты в желтом свете, составляющие около 6 %. В течение длительных периодов (несколько лет) полярные районы бывают покрыты белыми облаками. Согласно данным обсерватории Пик-дю-Миди, это явление не наблюдалось в 1962—1966 гг., но имело место в течение не менее 25 % времени по крайней мере для одного из полюсов после 1967 г., причем только тогда, когда Венера находилась на одной из половин своей орбиты. Полярные облака являются преходящими и сохраняются лишь в течение нескольких недель или месяцев. Они возникают независимо на обоих полюсах.

Для изучения облачного покрова и динамики атмосферы Венеры важно установить, какого рода дифференциальное поглощение солнечной радиации (над, внутри или под облаками) ответственно за ультрафиолетовые контрасты. В связи с этим Травис [210] проанализировал различные механизмы, которые могут быть ответственными за контрасты, с целью выяснить, позволяют ли имеющиеся данные наблюдений сделать однозначный выбор, и сформулировать требования к будущим наблюдениям. Главный вывод работы [210] состоит в том, что имеющиеся результаты наблюдений не дают возможности сформулировать вполне определенные выводы о физической природе контрастов. Хотя можно определенно исключить влияние такого фактора, как дифференциальное рэлеевское рассеяние, обусловленное большими изменениями высоты верхней границы облаков, остается ряд других вероятных объяснений, обоснованность которых пока не удается оценить. Поэтому невозможно, в частности, установить локализацию того поглотителя, который вызывает контрасты, относительно определенного уровня в пределах наблюдаемого облачного покрова.

Существенное значение для решения этой задачи имеет обнаружение на основе предварительного анализа данных «Маринера-10»

более низкой поляризации темных областей при фазовых углах, близких к положению радуги. Если это будет подтверждено, то диапазон возможностей объяснения контрастов значительно сузится. В таком случае приемлемой окажется лишь модель «ультрафиолетовых» облаков, содержащих облачные частицы, отличные от частиц основного видимого слоя венерианских облаков.

С целью изучения природы контрастов Травис [210] получил новые данные о зависимости сферического альбеда от длины волны в диапазоне 0,225—1,06 мкм. Сопоставление этой зависимости со спектральным ходом ультрафиолетового контраста показывает, что контраст убывает с ростом длины волны значительно быстрее, чем поглощение, необходимое для объяснения спектрального хода альбеда. Так, например, при возрастании длины волны от 0,36 до 0,5 мкм контраст уменьшается в 30 раз, а поглощение — только в 7 раз. Таким образом, данные о спектральной зависимости контрастов и сферического альбеда показывают, что должен существовать по крайней мере один поглощающий компонент, отличный от того, который ответствен за ультрафиолетовые контрасты.

Наблюдаемое в области длин волн короче 0,52 мкм постепенное уменьшение сферического альбеда Венеры от значений, близких к 1, до примерно 0,4 на длине волны 0,3 мкм должно быть обусловлено влиянием какого-то компонента, находящегося в пределах или над основным облачным покровом. По-видимому, вариации свойств поглощающего компонента (в частности, его расположение относительно верхней границы облачного покрова) ответственны за контрасты яркости Венеры на длинах волн короче 0,4 мкм. Как уже отмечалось, данные наблюдений показывают с очень большой вероятностью, что доминирующим компонентом верхней части основного облачного покрова являются капли концентрированного водного раствора серной кислоты. Менее определенные выводы о сернокислотном составе облачного покрова в целом.

Поскольку серная кислота очень прозрачна в синей и ближней УФ областях спектра, она не может выполнять роль УФ поглотителя. В связи с этим было высказано предположение, что такого рода поглотителем служат частицы серы, образующиеся из содержащих серу газов, которые являются предшественниками серной кислоты. С целью идентификации УФ поглотителя Поллак и др. [156] предприняли анализ комплекса данных фотометрических и радиационных измерений с орбитального и спускаемого аппаратов АМС «Пионер—Венера», которые показывают, что УФ солнечная радиация поглощается большей частью основной толщью облаков, но лишь слабое поглощение имеет место выше облаков или в пределах верхней части облачного покрова, которой соответствует оптическая плотность, равная 1—2.

Сравнение данных АМС «Пионер—Венера» и наземных наблюдений с результатами теоретических расчетов для различных моделей облаков полностью исключает такие предполагаемые источники УФ поглощения, как двуокись азота, вещество метеоритов и летучие металлы. Изменение коэффициента поглощения графита и железа (вероятных компонентов метеоритов) в зависимости от длины волны настолько мало, что не в состоянии воспроизвести резкое возрастание альbedo Венеры от 0,4 к 0,5 мкм. Не соответствует наблюдаемому ходу альbedo и форма зависимости коэффициента поглощения двуокиси азота от длины волны. Серьезные трудности возникают и при обосновании предположения, что за поглощение ответственны малые (~1 мкм) или большие (~10 мкм) частицы серы. Хотя на первый взгляд модель малых частиц серы привлекательна, ей соответствует противоречащее наблюдаемому уменьшение сферического альbedo от 0,4 к 0,32 мкм и слишком слабое поглощение в области длин волн более 0,4 мкм. В случае больших частиц серы альbedo оказывается завышенным в интервале длин волн 0,3—0,4 мкм, а также не воспроизводится наблюдаемый спектральный ход альbedo в промежутках 0,32—0,4 мкм и вертикальный профиль эффективного потока радиации в видимой области спектра.

Наиболее правдоподобна модель, учитывающая влияние сернистого газа. Однако модель с сернистым газом не обеспечивает полного согласия с экспериментом: расчетное альbedo завышено в интервале 0,35—0,40 мкм, а в интервале 0,40—0,45 мкм расчетный спектральный ход альbedo оказывается неадекватным. Возможно, эти расхождения определяются недостаточной надежностью использованных в расчетах характеристик сернистого газа. Это относится, например, к данным о коэффициенте поглощения в области длин волн больше 0,32 мкм и содержании сернистого газа в нижних слоях атмосферы. Очень вероятно, что SO₂ определяет поглощение радиации облаками во всем интервале 0,20—0,32 мкм и играет определенную роль в области более длинных волн. В таком случае УФ контрасты яркости Венеры следует объяснить вариациями отношения смеси SO₂ в верхней части облачного покрова. По-видимому, темные участки облаков являются районами крупномасштабных восходящих движений и (или) усиленной местной турбулентности, где имеет место возрастание содержания SO₂ в верхней части облаков.

Анализ телевизионных изображений Венеры, полученных при помощи АМС «Маринер-10» показал, что зоны ультрафиолетовых потемнений неустойчивы. Продолжительность жизни некоторых из них составляет минуты, но может достигать нескольких часов и суток. Возможно, ультрафиолетовые темные облака образуются за счет вещества, которое, возникая в нижних слоях атмосферы, диссипирует или испаряется, достигая более высоких уровней. Поглощение ультрафиолетовой радиации может быть в данном случае обусловлено либо упомянутым веществом, либо продуктами его фотолитического разложения. Поглотитель должен при этом

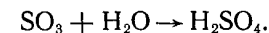
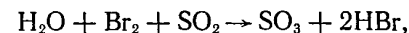
обладать оптическими свойствами, обеспечивающими наблюдаемый спектральный ход отражательной способности Венеры: слабый максимум вблизи 0,2 мкм, минимальное отражение около 0,3 мкм с постепенным его увеличением к 0,4 мкм.

Как показал Силл [184], веществом, которое имеет упомянутые свойства, является бром, растворенный в бромистом водороде. Под воздействием ультрафиолетовой солнечной радиации длин волн около 0,25 мкм происходит частичный фотолиз кислоты HBr с образованием растворов брома в кислоте и газообразного водорода:



что и обеспечивает наличие поглотителя ультрафиолетовой радиации с необходимыми свойствами.

Спектроскопические методы определения содержания бромистого водорода в атмосфере Венеры неосуществимы (в отличие от HCl и HF), поскольку его полосы поглощения в близкой инфракрасной области спектра (вблизи 2 мкм и 4 мкм) перекрываются с полосами углекислого газа. Однако по аналогии с соотношением концентраций галогеновых кислот на Земле можно прийти к оценке отношения смеси HBr/CO₂ ≈ 10⁻⁴. Если отношение смеси водяного пара достигает 10⁻³, возможно образование капель кислоты HBr. Эти капли должны испаряться в более высоких и сухих слоях атмосферы, что объясняет неустойчивость ультрафиолетовых темных облаков. При концентрации водного раствора кислоты, которая при температуре 250 К и указанных отношениях смеси составляет 52 % (по массе), показатель преломления капель равен 1,46; что находится в согласии с данными поляриметрических измерений. При наличии кислоты HBr с растворенным в ней бромом происходит быстрый процесс образования сернокислотных облаков в ходе реакций:



Там, где венерианская атмосфера содержит избыток HBr, образуются облака с примесью HBr·Br₂. Счетная концентрация этой примеси капель составляет, по-видимому, около 10 %.

Данные АМС «Венера-9, -10» указывают на то, что сернокислотные облака на Венере распространяются вниз лишь до высоты около 50 км. Вследствие тепловой непрозрачности, нижняя часть облака хорошо перемешивается за счет конвекции. Янг [221, 222] отметил следующее: если учесть сильную температурную зависимость поглощения радиации серой, то спектральная отражательная способность Венеры вполне удовлетворительно объясняется в предположении, что в области перемешивания облака (на высотах меньше 64 км) присутствует орторомбическая сера при отно-

сительной концентрации около 10^{-4} . В этом случае сульфатный аэрозоль может существовать на высотах больше 35 км.

Зависимость УФ контрастов яркости облаков от длины волн можно объяснить, если предположить, что выше области перемешивания происходят изменения оптической плотности сернокислотных облаков в пределах единицы. Крупные сульфатные частицы должны противостоять переносу их турбулентным перемешиванием в стратосферу, и поэтому УФ контрасты являются индикаторами вертикальных движений. Встречающаяся изредка аномалия отражательной способности на длинных волнах может быть приписана влиянию метастабильной серы, но для этого необходимо возрастание отношения смеси жидкой серы, чтобы она могла сохраняться ниже уровня, где образуется пластическая сера.

Для более надежного решения вопроса о природе УФ контрастов важны спектроскопические исследования темных и светлых областей Венеры при высокой разрешающей способности вплоть до длины волны 0,25 мкм в такие периоды, когда темные области проявляются особенно отчетливо. Эти данные имеют значение не только для выявления спектральной зависимости поглощения, ответственного за ультрафиолетовые контрасты, но и для лучшего понимания особенностей вертикального профиля поглощения солнечной радиации.

Если существует более чем один поглотитель, то весьма вероятно, что из 22 % поглощенной Венерой падающей солнечной радиации на долю «ультрафиолетового» поглотителя приходится только очень небольшая часть. Важное значение имеют измерения различий поляризации темных и светлых ультрафиолетовых неоднородностей. Особенно существенно получить новые сведения о поляризации и яркости Венеры в различных участках спектра и при разнообразных условиях с помощью аппаратуры, установленной на искусственном спутнике Венеры. До тех пор пока вопрос о физической природе ультрафиолетовых контрастов и локализации поглощения остается нерешенным, выводы о структуре и динамике атмосферы, сделанные по данным наблюдений контрастов, нельзя считать достаточно надежными, поскольку имеющиеся модели формирования контрастов допускают возможности их появления за счет поглощения как в облачном слое, так и за его пределами.

Существующие в настоящее время сведения о составе и структуре облаков были до недавнего времени получены преимущественно по данным наземных оптических измерений яркости и поляризации Венеры в видимой и близкой инфракрасной областях спектра. В основе их интерпретации лежит использование теории переноса излучения в поглощающей и рассеивающей газовой среде, содержащей взвешенные частицы аэрозолей, размеры которых велики по сравнению с длиной волны (или сравнимы с ней).

Вообще говоря, облака могут представлять собой как продукт конденсации газовых компонентов атмосферы, так и результат сдувания и переноса в атмосферу мельчайших частиц пыли. Если

справедливо первое, то облака должны быть локализованы в определенном слое атмосферы, где имеют место условия, благоприятные для конденсации (см. Гуди [106], А. М. Обухов и Г. С. Голицын [60]). Во втором случае пылевое облако может заполнить всю толщу атмосферы вплоть до уровня его верхней границы. Ввиду высоких температуры и давления вблизи поверхности Венеры можно предполагать наличие разнообразных газовых компонентов, которые могут образовывать слои конденсата в свободной атмосфере. Именно поэтому столь велико число гипотез, предлагающих разные варианты состава облаков. К числу важных задач, связанных с этим вопросом, относятся проблемы формирования спектральных линий и интерпретации данных измерений фазовых кривых яркости, открывающие возможности исследования вертикальной структуры облачного покрова. Хотя недавние прямые измерения с АМС «Венера» и «Пионер — Венера» в основном разрешили проблему структуры и состава облаков, данные дистанционных оптических измерений все еще представляют большой интерес.

4.2. Вертикальная структура облачного покрова

Не останавливаясь на истории теоретических исследований формирования спектральных линий, а также зависимости эквивалентной ширины от фазового угла, которые имели очень важное значение для интерпретации данных спектроскопических наблюдений, обратимся к краткой характеристике результатов последних работ по этим вопросам. Наиболее обстоятельные исследования принадлежат Ханту (см. [131]), который продемонстрировал прежде всего неудовлетворительность модели однородной и изотропно рассеивающей атмосферы. Использование такой модели не позволяет правильно описать ни наблюдаемую фазовую зависимость, ни контур спектральных линий. Разработка адекватной теории возможна лишь на основе учета вертикальной (гравитационной) неоднородности атмосферы и корректной теории переноса, в которой приняты во внимание реальная (вытянутая) индикатриса рассеяния и многократность рассеяния.

Интересным результатом работ Ханта было обнаружение того факта, что в случае линии CO_2 средней интенсивности (типичной для полосы 1,0488 мкм) и облака с сильно неизотропным рассеянием эквивалентная ширина линий монотонно уменьшается с ростом фазового угла лишь в том случае, когда фазовый эффект определяется влиянием облака. Если же преобладает влияние газового компонента, то при фазовых углах более 120° происходит рост эквивалентной ширины с увеличением фазового угла, т. е. наблюдается эффект «отражающего слоя». Такое же явление характерно и для слабых полос поглощения (например, 0,7820; 0,7888 мкм), но имеет другую природу.

Хант построил модель формирования спектральных линий в атмосфере Венеры, исходящую из предположения, что давление на уровне верхней границы основного облачного слоя составляет $2 \cdot 10^4$ Па, температура 240 К, а на уровне основания облака — $8 \cdot 10^5$ Па и 450 К. Расчеты по этой модели сделаны для монодисперсного облака при различных размерах частиц и показателях преломления. Результаты вычислений показывают, что кривые роста для моделей отражающей и рассеивающей атмосфер располагаются параллельно (за исключением того случая, когда закон

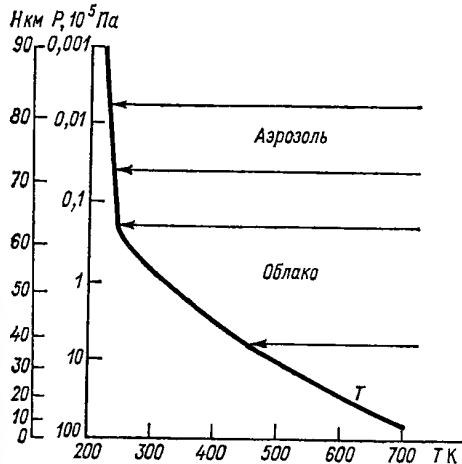


Рис. 4.1. Схематическая вертикальная структура облачного покрова Венеры (T — вертикальный профиль температуры).

квадратного корня справедлив для слабых линий). Это означает, что простая модель отражающего слоя, в которой не учитываются процессы рассеяния и поглощения частицами облаков, может быть достаточно пригодной для интерпретации данных спектроскопических измерений (определение эффективного давления и др.), если рассматриваемые участки кривых роста для обеих моделей совпадают.

Анализ результатов вычислений показал, что облака Венеры не могут быть однослойными, так как в таком случае должно наблюдаться монотонное увеличение эквивалентной ширины для ли-

ний слабых полос углекислого газа с фазовым углом, чего в действительности не происходит. Если предположить, что над основным облачным слоем расположен стратосферный слой дымки (уровни 50–60 гПа) с частицами радиусом 1 мкм и концентрацией 10 см^{-3} , то эквивалентная ширина сначала увеличивается в интервалах фазовых углов $0-90^\circ$, а затем сильно уменьшается (рассматриваемые результаты относятся к линии $0,7820 \text{ мкм}$). При концентрации частиц 20 см^{-3} имеет место обычно наблюдаемое уменьшение эквивалентной ширины с ростом фазового угла. Можно, таким образом, сделать вывод, что над основным облачным слоем Венеры располагается слой дымки, имеющий малую оптическую плотность (рис. 4.1).

Результаты, полученные Хантом, показали, что лишь исследование фазовых кривых эквивалентной ширины слабых спектральных линий позволяет обнаружить вертикальную структуру облачного покрова Венеры (ни контуры линий, ни сферические альбедо не являются для этого достаточно информативными). Влияние оптически тонкого аэрозольного слоя на уровень формирования

линий наиболее четко обнаруживается при фазовых углах более 110° . В таком случае линии поглощения формируются на более высоких уровнях, чем при наличии однослойного облака. Самым определенным индикатором существования стратосферного аэрозольного слоя является наличие участка увеличения эквивалентной ширины с ростом фазового угла. Если этот участок отсутствует, то в таком случае изолированный слой аэрозоля, по-видимому, не существует (аэрозоль распространяется вплоть до верхней границы основного облачного слоя).

Данные о фазовых вариациях яркости Венеры в полосах углекислого газа $0,7820$ и $0,7883 \text{ мкм}$ были истолкованы Хантом как свидетельствующие о двухслойности облачного покрова. Регас и др. (см. [131]) обратили внимание на то, что такой выход сделан путем сопоставления с результатами вычислений фазовых кривых яркости для моделей неоднородной атмосферы при наличии или отсутствии аэрозольного слоя над плотной облачностью Венеры. Кроме того, увеличение эквивалентной ширины с ростом фазового угла от 0 до 90° было интерпретировано Хантом как однозначное следствие существования двухслойной структуры облачности.

В связи с таким выводом в работе Регаса и др. показано, что уменьшение эквивалентной ширины при малых фазовых углах может происходить в результате влияния «заднего» лепестка индикатрисы рассеяния, которое имеет место при малых фазовых углах.

В ответ на возражения Хант отметил, что расчеты радиации, рассеянной назад, с учетом вертикальной неоднородности атмосферы и индикатрисы рассеяния для частиц Ми показали следующее: 1) характерные спектроскопические особенности рассеянной радиации не зависят от таких деталей индикатрисы рассеяния, как глории, радуга и др.; 2) форма фазовых кривых для углекислой атмосферы зависит от вертикальной структуры венерианских облаков. Это опровергает возражения против выводов о двухслойной структуре облаков, основанные на предположении о влиянии заднего лепестка индикатрисы рассеяния. Вывод о не менее чем двухслойной структуре облачного покрова согласуется не только с результатами расчетов, но и с данными измерений яркости и поляризации.

Уайтхилл и Хансен (см. [131]) продолжили дискуссию о факторах, определяющих «обратный фазовый эффект», напомнив, что при наблюдениях эквивалентной ширины линий поглощения углекислого газа в атмосфере Венеры обнаружено уменьшение эквивалентной ширины с уменьшением фазового угла в области малых фазовых углов. Так, например, эквивалентная ширина вблизи длины волны $0,782 \text{ мкм}$ уменьшается при фазовых углах $0-30^\circ$ на $10-30\%$. Хотя эти данные не вполне надежны из-за сравнимых по величине вариаций эквивалентной ширины ото дня ко дню, тем

не менее они были использованы для вполне определенных выводов о вертикальной структуре облаков Венеры.

Как уже отмечалось ранее, расчеты показали, что если считать надоблачный слой венерианской атмосферы однородным и изотропно рассеивающим, то должно иметь место монотонное увеличение эквивалентной ширины линий поглощения с уменьшением фазового угла. Поэтому следует считать, что обратный фазовый эффект в области малых фазовых углов обусловлен неизотропностью рассеяния или вертикальной неоднородностью атмосферы (наличием «вторичных» облачных слоев), либо обоими этими факторами. Если, однако, неизотропность рассеяния не вызывает обратного фазового эффекта, то можно считать, что он обусловлен вертикальной неоднородностью атмосферы.

Отмеченные противоречия побудили Уайтхилла и Хансена (см. [131]) рассчитать зависимость эквивалентной ширины линий поглощения от фазового угла для модели однородного облака с частицами, характеристики которых (форма, показатель преломления и распределения по размерам) заимствованы из данных поляриметрических измерений. Положенная в основу расчетов индикатриса рассеяния вычислена для длины волны 0,782 мкм в предположении, что показатель преломления вещественный и равен 1,43, а функция распределения концентрации частиц по размерам $N(r)$ соответствует формуле:

$$N(r) = \text{const } r^{\frac{1-3b}{b}} e^{-\frac{r}{ab}}, \quad (4.1)$$

где $a = -1,05$ мкм — средний эффективный радиус; $b = 0,07$.

Для рассматриваемой индикатрисы характерно существование двух вторичных максимумов рассеяния назад в диапазоне углов рассеяния $150-180^\circ$ (пик при 160° соответствует «радуге», а при 180° — «глории»).

Результаты расчетов, сделанных по методу удвоения, были осреднены по освещенной части планеты. Они прежде всего свидетельствуют о наличии обратного фазового эффекта, обусловленного спецификой индикатрисы рассеяния Ми, выражающейся в существовании максимумов рассеяния назад. Фазовые кривые настолько четко воспроизводят особенности индикатрисы, что это позволяет поставить обратную задачу определения индикатрисы рассеяния по данным измерений фазовых кривых эквивалентной ширины линий. Решение такой задачи серьезно осложняет, однако, наличие межсуточной изменчивости эквивалентной ширины и сравнимого по величине эффекта неоднородности атмосферы. Едва ли поэтому постановка упомянутой обратной задачи является практически перспективной. Поскольку индикатриса рассеяния известна достаточно хорошо, целесообразно исследовать по данным о фазовых кривых эквивалентной ширины линии вертикальную структуру атмосферы, хотя и в этом случае остается проблема учета межсуточной изменчивости. По-видимому, наиболее перспектив-

ным с этой точки зрения является использование данных о контурах линий.

Фукута (см. [131]) отметил, что инфракрасная абсорбционная спектроскопия, основанная на анализе вращательных и колебательно-вращательных полос, является особенно эффективным методом изучения земной атмосферы. Для интерпретации получаемых данных большое значение имеет выбор адекватной модели атмосферы, которая описывает особенности формирования линий поглощения. Как уже отмечалось, в настоящее время применяются две модели, исходящие из предположений либо о наличии отражающего слоя облаков (в данном случае линии формируются в надоблачном слое), либо о прохождении излучения внутрь облаков и формировании линий под влиянием рассеяния в облаках.

Анализируя условия венерианской атмосферы, Фукута показал, что при наличии облаков в виде конденсата важно учитывать следующие три фактора: 1) обмен компонентов облака с надоблачным слоем, обусловленный конвекцией (это приводит к тому, что химический состав облака и надоблачного слоя оказывается одинаковым); 2) распределение газовых компонентов между газовой фазой и конденсатом, зависящее от растворимости газов; 3) потеря «характеристических» молекул в конденсированной фазе вследствие диссоциации. Рассмотрение имеющихся данных приводит к выводу, что в условиях атмосферы Венеры формирование линий HCl и HF происходит либо в надоблачном слое, если считать, что частицы облаков находятся в жидкой фазе, либо в рассеивающем слое облака, если оно является ледяным (в этом случае весь HCl, имеющийся в облаке, может находиться только в газовой фазе).

Резюмируя результаты первоначальных теоретических исследований, посвященных проблеме формирования спектральных линий и интерпретации фазовых кривых эквивалентной ширины линий, следует констатировать, что возникновение минимума эквивалентной ширины при малых фазовых углах может быть обусловлено как влиянием многослойности облачного покрова Венеры, так и индикатрисным эффектом.

Необходимость интерпретации данных наблюдений планет при помощи АМС в форме изображений края диска (лимба) и терминатора при высоком пространственном разрешении диктует потребность рассмотрения задачи о переносе излучения с учетом сферичности. В связи с этим Вальбах и Хапке [213] получили решение такого рода задачи с учетом многократного рассеяния в предположении экспоненциального спада с высотой концентрации рассеивающего компонента (принято, что шкала высот мала по сравнению с радиусом планеты и постоянна в пределах зоны, определяющей формирование яркости планеты). Рассматриваемое решение является точным для рассеяния первого порядка, но приближенно учитывает многократное рассеяние.

Предложенная методика использована для имитационных расчетов с целью интерпретации изображений районов лимба и терминатора Венеры, полученных при помощи АМС «Маринер-10». Подобный анализ позволил выявить наличие «оторванного» слоя дымки на высотах более 100 км, кроме обнаруженного ранее слоя 79—85 км. Несомненно, что новый слой имеет глобальные масштабы, является устойчивым и образуется вблизи верхней границы верхнего слоя дымки, обнаруженного по данным АМС «Пионер — Венера». По данным обеих АМС местоположение, шкала высот и толщина рассматриваемого аэрозольного слоя были примерно одинаковыми, тогда как характеристики расположенных ниже слоев изменились.

В работе [213] обсуждены два возможных объяснения природы «лимбовой» дымки: 1) нижняя ее часть представляет собой сернокислотную облачность, тогда как «оторванный» слой является дымкой, состоящей из частиц водного льда; 2) «оторванный» слой существует не изолированно, а является частью сернокислотной дымки, тогда как прозрачный слой на высотах 75—80 км служит зоной источника поглощающего солнечную радиацию компонента. В связи со вторым предположением проанализировано пространственное распределение сильного поглотителя радиации в близкой УФ области спектра, которым может быть элементарная сера. Высказано несколько соображений, из которых следует, что УФ поглотитель распространяется до верхней части слоя дымки (непоглощающей дымки не существует).

АМС «Венера-8, -9 и -10» позволили впервые получить данные прямых измерений вертикальной структуры облачного покрова. Установленные на спускаемых аппаратах АМС «Венера-9» и «Венера-10» нефелометрические комплексы МНВ-75 предназначены для осуществления экспериментов по определению высотной структуры и микрофизических характеристик аэрозольного компонента атмосферы и облаков. Комплекс МНВ-75 выполнен в виде двух приборов: МНВ-75-1, который имеет три фотоприемника (кремниевые фотодиоды) с оптическими осями, расположенными под углами 4, 15 и 45° по отношению к оптической оси излучателя (газовая лампа мощностью 27 Вт; в сочетании со спектральной чувствительность фотодиодов эффективная длина волны равна 0,92 мкм), и МНВ-75-2, обладающего одним фотоприемником, который измеряет интенсивность света, рассеянного назад (под углом 180°). Градуировка МНВ-75 производилась в большой аэрозольной камере по искусственным водным туманам.

М. Я. Маров и др. [51] кратко охарактеризовали методику обработки результатов измерений, использование которой (в предположении, что показатель преломления частиц равен 1,44) привело к хорошо согласующимся значениям параметров облачных частиц в районах спуска обоих аппаратов. Анализ вертикальных профилей коэффициента рассеяния $\beta(H)$ показывает, что венерианские облака (нефелометрический комплекс функционировал в диапазоне высот 62—33 км) представляют собой мутный слой

с переменной прозрачностью и четко выраженной структурой (слоистостью) без заметных разрывов (рис. 4. 2). Профили $\beta(H)$, отстоящие друг от друга на расстояние около 2000 км, очень по-

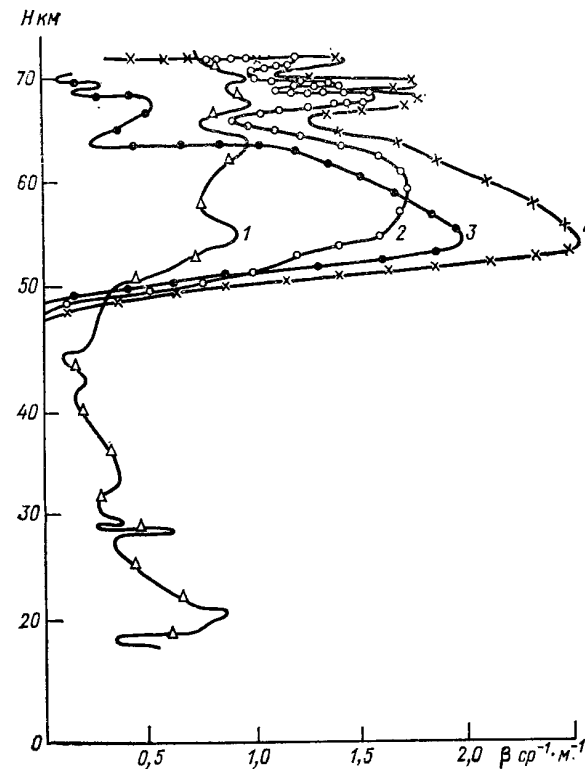


Рис. 4.2. Вертикальные профили коэффициента рассеяния по данным измерений при помощи нефелометра («Венера-9») для углов 4, 15, 45 и 180°.

1 — $\beta_{180} \cdot 10^4$; 2 — $\beta_{15} \cdot 10^3$; 3 — $\beta_{45} \cdot 10^2$; 4 — $\beta_0 \cdot 10^4$.

хожи, а коэффициенты ослабления по данным «Венеры-9» в 2—3 раза меньше, чем по данным «Венеры-10». В обоих случаях высота нижней границы облаков равна примерно 49 км. Оптические плотности слоев облачности (49—62 км) в районах спуска «Венеры-9» и «Венеры-10» составляют соответственно 20—25 и 50—55. Минимальное значение метеорологической дальности видимости достигается в слое 53—51 км и составляет по данным «Венеры-9 и -10» соответственно около 1,5 и 0,7 км.

На каждом участке спуска можно выделить характерные зоны облачности с несколько различающимися микроструктурными ха-

рактическими (заметные вариации наблюдаются и внутри этих зон). Микроструктура частиц близка к гамма-распределению с параметром $\mu = 2 \dots 4$. На высотах меньше 49 км заметным оставался лишь сигнал для угла 180° . Это можно интерпретировать как результат наличия в атмосфере аэрозоля в виде сферических прозрачных частиц с коэффициентом преломления $1,8-2,0$, радиусом $r \geq 2,5$ мкм и концентрацией $N > 5 \text{ см}^{-3}$. В этом случае коэффициент ослабления равен примерно $2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}$ (метеорологическая дальность видимости больше 20 км), а аэрозольная оптическая плотность слоя 49—18 км составляет около 3. Весьма вероятно, что атмосферный аэрозоль, обнаруженный в слое 49—18 км, присутствует вплоть до поверхности планеты (природа этого аэрозоля остается неясной). По-видимому, большая часть аэрозоля сконцентрирована в слое 25—18 км.

Установленные на спускаемых аппаратах «Венера-9» и «Венера-10» идентичные узкополосные фотометры снабжены тремя интерференционными фильтрами с полосами пропускания шириной около 5 нм, центрированными при следующих длинах волн: 800 нм (непрерывный спектр), 820 нм (полоса поглощения водяного пара), 870 нм (полоса поглощения углекислого газа). Фотометры направлены в верхнюю полусферу под углом около 45° к вертикали. Узкая диаграмма направленности фотометров (ширина около 5°) в сочетании с достаточно высокой относительной точностью измерений позволила выявить сравнительно слабые оптические неоднородности, например, — колебания интенсивности, обусловленные прохождением СА во время спуска через отдельные облачные образования различных масштабов — от 100 м до нескольких километров.

Программа работы обоих СА предусматривала фотометрическое зондирование слоя 64—34 км; время спуска в этом слое составляло около 30 мин. На высоте 50 км происходило отделение парашюта; скорость спуска после этого возрастала и дальнейшее снижение шло с использованием жесткой аэродинамической системы. Измерения выполнены на дневной стороне планеты. Зенитное расстояние Солнца в месте посадки составляло около 30° . Обработка результатов измерений [52] показала, что основной облачный слой Венеры расположен выше 50 км. Коэффициент рассеяния в облаках составляет около $1 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ (по-видимому, в некоторых сгущениях он возрастает до 10^{-4} см^{-1} и более), а концентрация частиц равна примерно 200 см^{-3} . Поскольку коэффициент рассеяния, равный 10^{-5} см^{-1} , соответствует метеорологической дальности видимости около 4 км, венерианские облака следует рассматривать как подобные земной разреженной дымке или туману (в наиболее плотных земных облаках коэффициент рассеяния достигает 10^{-3} см^{-1}).

Выше уровня 64 км находится часть облачного слоя, который соответствует 10—20 % его полной оптической плотности. В интервале высот 35—50 км коэффициент рассеяния уменьшается примерно в 2—3 раза. Возможно, на высотах 35—45 км существует

второй слой облаков. Ниже 35 км, по-видимому, доминирует чисто газовая атмосфера с характерным для нее рэлеевским рассеянием. Во всей исследованной толще атмосферы (34—64 км), оптическая плотность которой равна 20—30, на длине волны 800 нм наблюда-

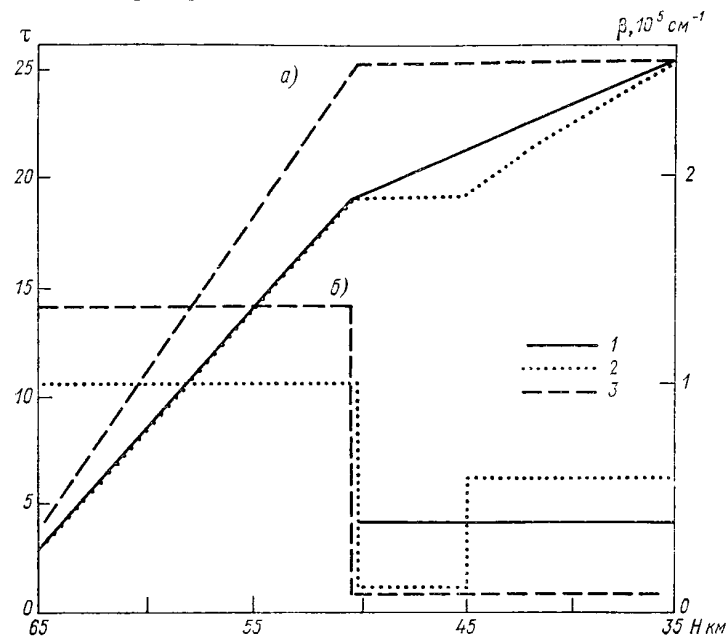


Рис. 4.3. Вертикальные профили оптической плотности (а) и коэффициента рассеяния (б) для трех моделей облачного покрова (1, 2, 3).

ется рассеяние, близкое к консервативному: $(1 - \tilde{\omega}) < 10^{-3}$ ($\tilde{\omega}$ — альбеда однократного рассеяния).

Таким образом, венерианский облачный покров является слабо поглощающим в диапазоне непрерывного спектра (по-видимому, этот диапазон достаточно широк). Облака состоят из отдельных компактных образований, размеры которых изменяются от нескольких сот метров до нескольких километров. На рис. 4.3 воспроизведены вертикальные профили коэффициента рассеяния β и оптической плотности τ , соответствующие трем моделям облачного слоя, которые предложены В. И. Морозом и др. [52]. В диапазоне высот 25—45 км отношение концентраций H_2O и CO_2 составляет около 10^{-3} . Обобщив результаты исследований вертикальной структуры облачного покрова с учетом данных АМС «Венера» и «Пионер — Венера», М. Я. Маров [24] предложил изображенную на рис. 4.4 примерную схему структуры облачности.

В комплексе с радиометрическими, фотометрическими и поляриметрическими измерениями с орбитальных аппаратов АМС «Венера-9» и «Венера-10» осуществлена регистрация спектра излу-

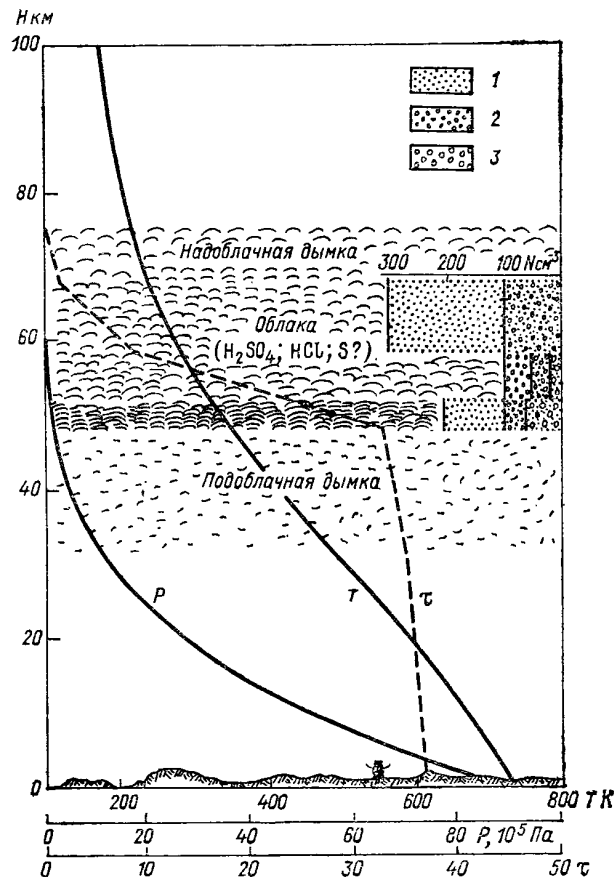


Рис. 4.4. Схема пространственной структуры облачного покрова.

Диаметр частиц в мкм: 1) <1,5; 2) 1,5—5; 3) 5—35.

чения планеты в интервале длин волн 1,6—2,8 мкм, где находится система очень сильных полос CO_2 , расположенных около 2 мкм. В. И. Гнедых и др. [16] описали использованный для этой цели инфракрасный спектрометр с клиновым круговым интерференционным светофильтром, обеспечивающим низкое спектральное разрешение (около 0,1 мкм), но довольно высокое пространственное разрешение (до нескольких десятков километров). Время регистрации одного спектра составляет 10 с. Данные измерений получены примерно в 20 сеансах.

Проведены три типичные трассы измерений, проходящие в экваториальном поясе $0-20^\circ$ ю. ш. при угле фазы $\alpha = 62^\circ$ («Венера-10», 6 ноября 1975 г.) в высоких широтах при $\alpha = 63^\circ$ и умеренных широтах при $\alpha = 122^\circ$ («Венера-9», 13 ноября 1975 г.) В зарегистрированных при низком разрешении спектрах полосы CO_2 около 2 мкм проявляются как единая полоса. Анализ полученных данных показывает, что эта полоса формируется внутри рассеивающей облачной среды. Изменчивость эквивалентной ширины полосы 2 мкм в зависимости от фазового угла и положения визируемой точки относительно центра и края диска планеты хорошо описывается моделью облака как рассеивающего слоя и не согласуется с моделью простого отражения. Высота верхней границы слоя облачности как того уровня, на котором концентрация рассеивающих частиц уменьшается в e раз, составила около 65—68 км. Изменение концентрации с высотой характеризуется шкалой высот, составляющей примерно 3—5 км.

С учетом данных фотометрических измерений на спускаемом аппарате можно считать наиболее вероятной следующую модель облака вблизи его верхней границы: объемный коэффициент рассеяния не изменяется с высотой в слое от 50 до 60—65 км и равен в среднем 10^{-5} см^{-1} , а выше — уменьшается с высотой при шкале высот около 3—5 км. При характерных масштабах 50—100 км и более верхняя граница облаков оказывается очень гладкой: вариации ее высоты не превышают 1—2 км.

Абсолютное значение и угловое распределение яркости облачного покрова в непрерывном спектре для интервала длин волн 2,2—2,4 мкм хорошо соответствуют модели полубесконечной атмосферы при альбедо однократного рассеяния $\tilde{\omega} \approx 0,48$ и асимметрии индикатрисы Хенли—Гринштейна $q \approx 0,7$. В 2-мкм диапазоне существенно проявляется влияние истинного поглощения: мнимая часть комплексного показателя преломления составляет около $1 \cdot 10^{-3}$, что согласуется с моделью облака, состоящего из капель концентрированного водного раствора серной кислоты.

Исследования облачного покрова Венеры привели к выводу, что его верхняя часть состоит из частиц, характеризующихся многомодальной микроструктурой, а над облаками располагается мелкодисперсная дымка, для которой типично очень однородное распределение в умеренных широтах северного полушария. Лэйн и Опстбаум [141] выполнили обработку данных установленного на АМС «Пионер — Венера» облачного фотополяриметра с целью восстановления пространственной структуры и свойств дымки по угловому распределению яркости планеты на длинах волн 365 нм и 690 нм вблизи края диска (лимба). Анализ полученных результатов показал, что оптическая плотность дымки, равная 0,01, соответствует слою атмосферы выше 80—85 км. Минимальная высота верхней границы слоя дымки наблюдается в полосе подсол-

нечных долгот, но наряду с зависимостью высоты дымки от долготы имеет место и ее зависимость от времени.

Результаты теоретических расчетов яркости дымки в приближении однократного рассеяния согласуются с данными наблюдений, если принять радиус частиц меньше 0,3 мкм и показатель преломления меньше 0,7, что в целом не противоречит возможности сернокислотного состава дымки, но допускает и другие варианты. Согласно поляритметрическим данным, счетная концентрация частиц субмикронной дымки составляет около 200 см^{-3} , а облачных частиц радиусом около 1 мкм — примерно 30 см^{-3} на уровне 28 гПа, что соответствует шкалам высот 3,6 км и 2,3 км или меньше в слое 2—28 гПа. Шкала высот в слое 0,5—2 гПа варьирует в пределах 1—3 км по данным для полосы 15—45° и местного времени 09—18 ч за время, равное примерно одному сезону. Иногда наблюдаются «оторванные» слои дымки. Оценке шкалы высот, равной 2,2 км на высоте 84 км, соответствует значение коэффициента турбулентной диффузии $1,3 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{с}$.

4.3. Химический состав, микроструктура и оптические свойства облаков

Одной из наиболее характерных особенностей облачного покрова Венеры (а поэтому и планеты в целом) является его высокое альbedo в видимой области спектра, сравнимое с альbedo мощных кучевых облаков на Земле или покрытых снегом полярных шапок. Естественно, что высокое альbedo облаков Венеры свидетельствует об их большой оптической плотности и значительной вертикальной протяженности. Вращательная температура для полос углекислого газа в интервале длин волн 0,7—2,0 мкм имеет стабильное значение около 240 К, которое близко соответствует эффективной температуре, найденной по значению уходящего теплового излучения, и свидетельствует об однородности облачного покрова. Радиорефракционные данные АМС «Маринер-5», а также осуществленная Хантом интерпретация фазовых кривых (см. п. 4.2) позволили сделать вывод, что над основным облачным покровом, верхняя граница которого располагается на уровне около 240 гПа, находится полупрозрачный слой дымки, достигающий примерно 5 гПа. Несомненно, облачность Венеры имеет многослойную структуру.

Отражательная способность Венеры изменяется в зависимости от длины волны: наблюдается уменьшение в сторону ультрафиолетовой (длины волн меньше 0,35 мкм) и инфракрасной ($\lambda \approx 3 \text{ мкм}$) областей спектра. Поэтому одним из путей установления состава венерианских облаков стало сопоставление их отражательных свойств с аналогичными свойствами земных облаков и искусственных сред (в лабораторных условиях). В связи с этим важное значение имеют данные об оптических постоянных воды и льда, а также расчеты отражательной способности облаков.

4.3.1. Отражательная способность облаков

Проанализировав имеющиеся данные измерений спектральной яркости земных водных и ледяных облаков и сопоставив их со спектром отражения Венеры, К. Я. Кондратьев и О. И. Смоктий [27] отметили общее подобие кривых спектральной отражательной способности, что допускало водную природу облаков Венеры. Для спектра отражения ледяных облаков на Земле характерны широкие полосы поглощения вблизи длины волны 1,5 и 2,0 мкм и очень слабое отражение при длинах волн более 2,7 мкм. В спектре Венеры, полученном Боттема и др. (см. [30, 34]) с аэростата, эти особенности слабо различимы из-за влияния сильного поглощения углекислым газом в венерианской атмосфере, что не позволяет сделать определенного вывода о ледяной природе облаков. Одна из возможностей получить представление о природе облаков Венеры состоит в сравнении измеренных и расчетных спектров отражения. Как отметили авторы [27], подобная методика может быть использована и для оценки размеров частиц.

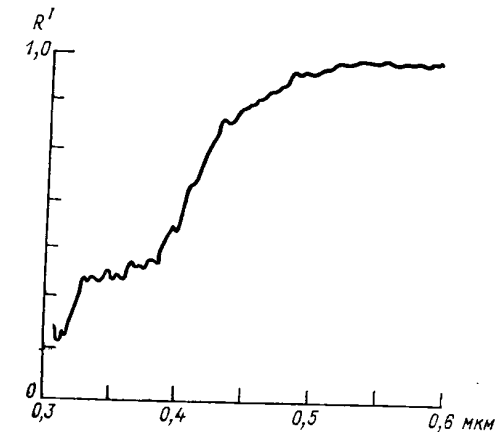


Рис. 4.5. Отражательная способность и сферическое альbedo Венеры в видимой и ультрафиолетовой областях спектра.

При помощи спектрометра с дифракционной решеткой, установленного в фокусе куде 2,7-метрового рефлектора Макдональдской обсерватории, Баркер [75] осуществил регистрацию спектров всего диска Венеры и центра диска Солнца (для целей калибровки) в диапазоне 0,3067—0,5960 мкм. Анализ данных измерений отражательной способности облачного покрова Венеры R' , представленных на рис. 4.5, позволяет сделать следующие выводы: 1) после «плато» в диапазоне 0,596—0,520 мкм отражательная способность уменьшается в интервале длин волн 0,520—0,395 мкм; 2) в промежутке 0,395—0,340 мкм зависимость от длины волны практически отсутствует, а значение R' составляет около 55 % от значения R' на длине волны 0,6 мкм; 3) при дальнейшем укорочении длины волны (в пределах интервала 0,33—0,32 мкм) отражательная способность уменьшается на 20—25 %.

Данные о спектральном ходе в области длин волн меньше 0,31 мкм противоречивы и требуют дальнейших исследований.

Фазовая зависимость отражательной способности в диапазоне фазовых углов $40\text{--}76^\circ$ и ее временные вариации примерно одинаковы, причем в обоих случаях изменений спектрального хода отражательной способности не наблюдается. Поэтому можно истолковать фазовую зависимость как проявление суточного хода, который обусловлен, по-видимому, изменением доли площади диска планеты, занятой темными областями. Спектральный ход относительной (нормированной по отношению к длине волны $0,51\text{ мкм}$) отражательной способности всего диска и отражательной способности темных областей по отношению к ярким одинаков. Однако отражательная способность не имеет спада до 55% -ного уровня в интервале $0,340\text{--}0,395\text{ мкм}$, что свидетельствует о существовании значительного количества ультрафиолетового поглотителя и над яркими областями.

Отсутствие спектральной структуры отражения вблизи $0,5\text{ мкм}$ и в интервале $0,9\text{--}1,0\text{ мкм}$ свидетельствует о невозможности существования в качестве компонента венерианских облаков дигидрата хлористого железа ($\text{FeCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), как это предполагалось ранее. Рассматриваемый спектральный ход отражательной способности облаков можно объяснить наличием частиц из полиморфных серосодержащих соединений, которые могут возникать в результате фотодиссоциации COS , излучением длин волн более $0,22\text{ мкм}$. Этот вывод подтверждается данными лабораторных исследований.

Используя стабилизированный гироскопами 30-сантиметровый телескоп, установленный на самолете (точность наведения — около $1'$), Поллак и др. [155] осуществили регистрацию спектров Венеры и Солнца (для сравнения) с применением спектрометров, которые позволяли выделить следующие области спектра: $1,2\text{--}2,3\text{ мкм}$ (разрешение $0,03\text{ мкм}$); $2,25\text{--}4,10\text{ мкм}$ ($0,05\text{ мкм}$), $0,65\text{--}1,30\text{ мкм}$ ($0,02\text{ мкм}$) и $2,8\text{--}5,5\text{ мкм}$ ($0,06\text{ мкм}$). Обычно регистрация спектров Венеры занимала $60\text{--}70\text{ мин}$, а Солнца $30\text{--}40\text{ мин}$ (все наблюдения Венеры сделаны при Солнце, находящемся под горизонтом).

В согласии с многими другими работами, полученные данные, относящиеся к фазовому углу 40° в интервале $1\text{--}4\text{ мкм}$ (рис. 4.6) и углу 136° в области $3\text{--}6\text{ мкм}$, подтвердили, что верхняя часть венерианских облаков состоит из капель водного 75% -ного раствора серной кислоты. Сравнение двух серий наблюдений в интервале $1\text{--}4\text{ мкм}$ позволило выявить интересную зависимость от фазового угла α : отражательная способность вблизи 3 мкм значительно ниже при малых α , чем при больших, а в промежутке $1,3\text{--}2,5\text{ мкм}$ R' уменьшается с ростом длины волны существенно быстрее при малых фазовых углах. Данные измерений при фазовом угле 40° позволяют заключить, что сернокислотный состав облачного покрова сохраняется до оптических плотностей, составляющих многие десятки единиц, т. е. на большом расстоянии от верхней границы облачности (по крайней мере до высот порядка 45 км). Детальное обсуждение возможных вариантов состава

облаков привело авторов [155] к выводу, что наиболее вероятным следует считать сернокислотный состав при концентрации серной кислоты, равной 85% (по массе). Рисунок 4.7 наглядно иллюстрирует преимущество «сернокислотной» гипотезы.

Дево и др. [93] использовали прокалиброванные в абсолютных единицах телевизионные изображения Венеры в ультрафиолето-

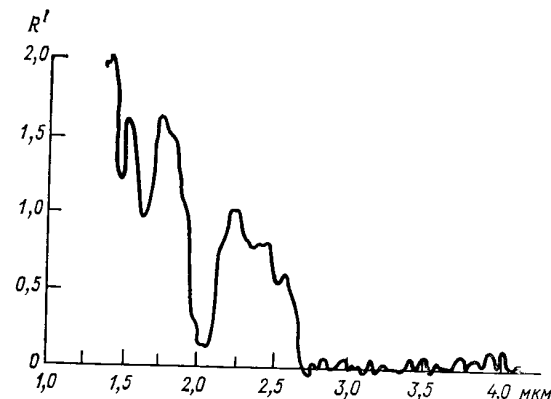


Рис. 4.6. Отражательная способность Венеры в ближней инфракрасной области спектра при $\alpha = 40^\circ$, нормированная по отношению к ее значению при длине волны $2,2\text{ мкм}$.

вых, голубых и оранжевых лучах, полученные при помощи АМС «Маринер-10» при фазовом угле $23,35^\circ$, для сопоставления с результатами расчетов полей яркости в соответствующих участках спектра ($0,36$; $0,46$ и $0,58\text{ мкм}$) с целью изучения вертикальной структуры облачного покрова. Расчеты, сделанные для модели однородного облака в слое $32\text{--}70\text{ км}$ с параметрами, соответствующими данным поляризметрических измерений (эффективный радиус частиц $1,1\text{ мкм}$, показатель преломления $1,44$, альbedo однократного рассеяния на длине волны $0,7\text{ мкм}$ равно $0,9998$, а оптическая плотность облака составляет 135), показали, что такая модель качественно согласуется с данными наблюдений.

Имеют место, однако, большие количественные расхождения, особенно вблизи края диска планеты, свидетельствующие о неадекватности модели однородного облака. Поэтому были предприняты вычисления для двухслойной модели, локальные оптические параметры верхнего слоя которой идентичны параметрам однородной модели. Нижний слой считается полубесконечным. В таком случае оптическими параметрами модели являются: оптическая плотность τ_1 верхнего слоя облачности, альbedo однократного рассеяния $\tilde{\omega}$ и $\tilde{\omega}'$ обоих слоев и индикатриса рассеяния нижнего

слоя. Поскольку оценки показали, что в случае приближенных расчетов влияние формы индикатрисы рассеяния малосущественно, рассеяние нижним облачным слоем считается изотропным. Вычисления, относящиеся к длине волны 0,46 мкм, сделаны при

$\tau_1=1$ для двух вариантов: 1) $\tilde{\omega}=1$, отражательная способность нижнего слоя облаков $R'=0,76$; 2) $\tilde{\omega}=0,9322$, $R'=1$. В первом случае (консервативно рассеивающий верхний слой) результаты

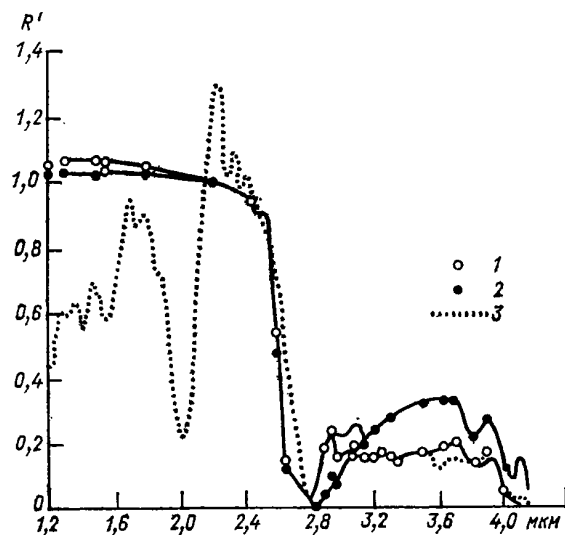


Рис. 4.7. Расчетная и измеренная при $\alpha=120^\circ$ отражательная способность Венеры, нормированная к значению при длине волны 2,2 мкм.

1 — 84,5 %-ный водный раствор серной кислоты, 2 — водный раствор соляной кислоты концентрацией 6 моль/л, 3 — результаты наблюдений.

практически совпадают с данными для модели однородного облака. Второй вариант (чисто рассеивающий нижний слой) дает результаты, лучше согласующиеся с наблюдениями вблизи края диска, но завышенную яркость в центре диска.

Чувствительным индикатором оптических свойств венерианских облаков должна быть яркость на длинах волн 3—4 мкм, где альbedo планеты очень мало, а поэтому отраженная радиация при фиксированном фазовом угле должна существенно зависеть от микроструктуры и состава облаков. В связи с этим в период 1970—1974 гг. на 2,7-метровом телескопе Макдональдской обсерватории Мартончик и Бир [146] осуществили регистрацию спектров Венеры в области длин волн 3—4 мкм помощи фурье-спектрометра, расположенного в фокусе куде телескопа. Абсолютные значения спектральной яркости в диапазоне волновых чисел 2500—

3000 см^{-1} при разрешающей способности 2 см^{-1} получены для фазовых углов, равных 31, 54, 94, 129 и 138.

С целью исследования зависимости яркости от фазового угла были отобраны значения для двадцати «микрооконов» прозрачности

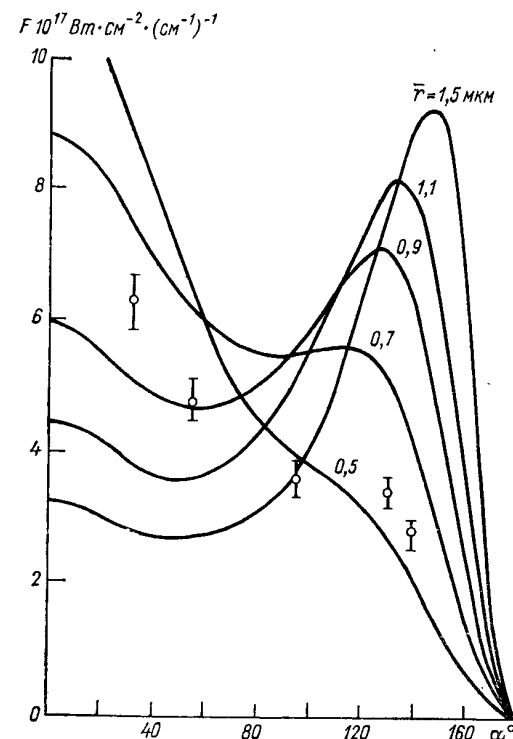


Рис. 4.8. Сравнение расчетных фазовых кривых яркости Венеры для волнового числа 2940 см^{-1} с данными наблюдений (кружки).

земной атмосферы, где не сказывается влияние поглощения. Для детального анализа данных выбраны результаты измерений яркости при волновом числе 2940 см^{-1} . В этом случае яркость Венеры определяется исключительно влиянием рассеяния, ввиду отсутствия поглощения и незначительности вклада теплового излучения атмосферы Венеры.

Сравнение с результатами расчетов для однородного облака, состоящего из капель радиусом r 75 %-ного раствора серной кислоты (рис. 4. 8), позволяет заключить, что характер фазовой кривой яркости определяется главным образом не комплексным показателем преломления (он принят равным 1,340—

—0,1985i), а безразмерным параметром $x=2\pi r/\lambda$ (r — радиус капель, λ — длина волны). Сопоставление измеренной и расчетных (для различных размеров капель) фазовых кривых яркости показывает, что модель однородного монодисперсного облака, которой соответствуют параметры микроструктуры, полученные по данным поляризационных измерений, не согласуется с данными

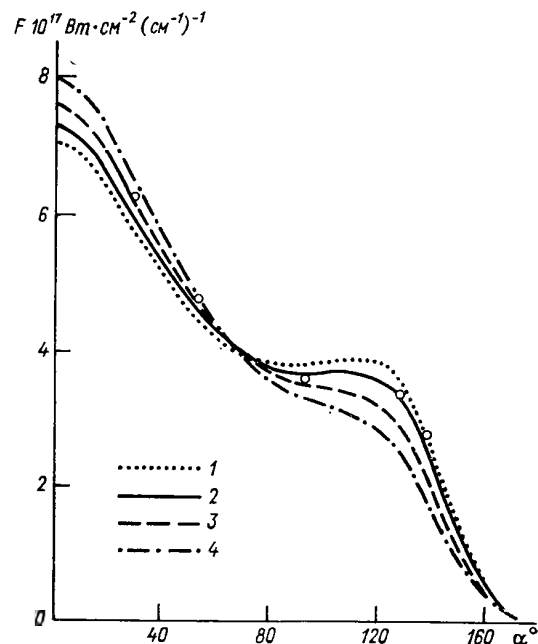


Рис. 4.9. Расчетные фазовые кривые яркости для волнового числа 2940 см^{-1} (случай двухслойного сернокислотного облака при концентрации H_2SO_4 75 %) и данные наблюдений (кружки).

$\bar{r}_1=0,4 \text{ мкм}$; $\bar{r}_2=1,1 \text{ мкм}$; 1) $\tau_1=0,20$; 2) $\tau_1=0,23$; 3) $\tau_1=0,28$; 4) $\tau_1=0,35$.

измерений яркости в интервале 3—4 мкм. По этой причине была рассмотрена модель двухслойного облака, характеризуемого тремя параметрами: средние радиусы частиц облачных слоев r_1 и r_2 и оптическая плотность τ_1 верхнего слоя (нижний слой предполагается полубесконечным). Наилучшее согласие с данными измерений получается при $r_1=0,4 \text{ мкм}$, $r_2=1,1 \text{ мкм}$ и $\tau_1=0,23$ (рис. 4.9).

Такая модель обеспечивает хорошее согласие измеренных и расчетных спектров яркости Венеры в диапазоне $2500\text{—}3000 \text{ см}^{-1}$. В этом случае расчеты были сделаны как для окон прозрачности, так и для всех остальных спектральных интервалов. Концентрация капель принята равной 100 см^{-3} . Отмеченное согласие измеренных и расчетных спектров является подтверждением серно-

кислотного состава облаков, выявленного ранее поляризметрическими измерениями. Совсем иная ситуация имеет место в отношении вертикальной структуры и микроструктуры облачности. При 2940 см^{-1} $\tau_1 \cong 1,6$ для $0,35 \text{ мкм}$ и $\tau_1 \cong 1,1$ (1 мкм), что намного превышает оптические плотности, соответствующие данным поляризационных измерений. Возможно, менее противоречивой окажется двухслойная модель при различном составе облачных слоев. Устранить противоречия данных интерпретации поляризметрических измерений яркости в интервале 3—4 мкм смогли лишь дальнейшие результаты прямых измерений.

Выполненный Хапке и Нельсоном [110] анализ данных о спектральной отражательной способности Венеры, для которой характерно наличие сильного спада в области длин волн короче $0,5 \text{ мкм}$, приводит к выводу, что поглощение в этой широкой области длин волн может быть обусловлено только компонентом облаков, который находится в жидкой или твердой фазе. Поскольку, с другой стороны, водный раствор серной кислоты, являющийся основным компонентом облаков, не обладает поглощением в ультрафиолетовом диапазоне, следует предположить наличие в облаках другого вещества. Возможное влияние рэлеевского рассеяния как фактора ультрафиолетовых контрастов облачности исключается, так как спектры яркости Венеры не обнаруживают обратной зависимости от четвертой степени длины волны.

Сходство спектров относительной отражательной способности систем Венера—Солнце и темные—светлые облака Венеры побуждает искать в качестве компонента, ответственного за поглощение в ультрафиолетовой области спектра, только одно вещество, так как «ультрафиолетовым» светлым и темным районам соответствует различное содержание этого компонента (больше для темных районов).

В отличие от спектров газов, спектры жидких или твердых тел невозможно использовать для однозначной идентификации поглощающего излучение вещества. Детальное изучение спектров многих веществ, которые наблюдаются или могут существовать в венерианской атмосфере, позволяет выбрать серу как компонент, сочетающийся с концентрированным водным раствором серной кислоты облачных капель. Как известно, сера инертна по отношению к серной кислоте, и обычной модификацией серы, устойчивой при комнатной температуре, является орторомбическая циклооктасера S_8 . В связи с этим в работе [110] рассмотрены две модели облачности: 1) смешанного полубесконечного облака, состоящего из частиц серы и капель раствора серной кислоты; 2) двухслойной облачности, которая представляет собой сочетание слоя капель, расположенного над полубесконечным слоем частиц серы. Расчеты осредненных спектров отражательной способности Венеры в диапазоне $0,36\text{—}0,41 \text{ мкм}$ для упомянутых

моделей, сделанные на основе использования двухпоточкового приближения, показали (рис. 4. 10), что в первом случае наилучшее согласие с данными наблюдений получается, если принять радиус частиц серы 10 мкм, а капель серной кислоты 1 мкм при отношении их счетных концентраций, равном 1:670. Отношение

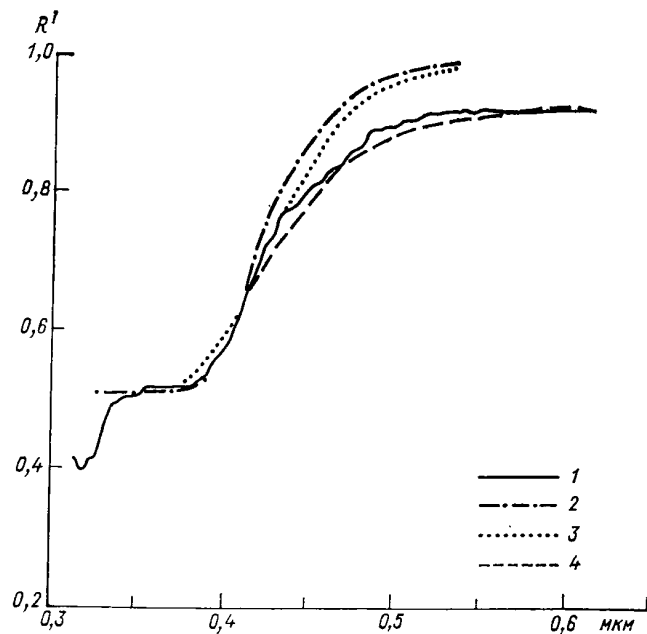


Рис. 4.10. Расчетные и наблюдаемые спектры отражательной способности Венеры.

1 — данные наблюдений Макдональдской обсерватории; 2 — смешанное полубесконечное облако, состоящее из серной кислоты и циклооктасеры; 3 — двухслойная облачность (слой сернокислотной дымки находится над оптически плотным облаком из частиц серы); 4 — смешанное облако из капель серной кислоты и полиморфной серы.

массовых концентраций составляет, однако, 1,8, т. е. облако содержит 64 % серы (по массе).

Модель двухслойной облачности оказывается наиболее адекватной при радиусе капель в верхнем слое, равном 1 мкм, и единичной оптической плотности этого слоя. Нижний слой должен состоять из частиц серы радиусом 3,6 мкм. При перечисленных параметрах обе модели приводят к практически идентичным спектрам отражения, имеющим более высокую отражательную способность в области длин волн больше 0,45 мкм, чем по данным наблюдений.

Если учесть возможность существования в условиях атмосферы Венеры иных модификаций серы, кроме орторомбической S_8 (на-

пример, S_6 и полиморфной серы), т. е. считать вероятной неполную полимеризацию серы до S_8 , можно получить практически полное совпадение расчетной и наблюдаемой отражательной способности, исключая полосу поглощения вблизи 0,3 мкм. Возможно, однако, что эта полоса не является реальной.

Стоксова скорость падения для частиц радиусом 10 и 3,6 мкм равна соответственно 3 и 0,4 см/с. Поэтому распределение частиц серы вблизи верхней границы облаков должно в первую очередь определяться полями горизонтальной и вертикальной скоростей ветра, откуда следует сделать вывод, что динамика ультрафиолетовых контрастов может служить индикатором поля ветра.

Основным источником серы должна быть фотодиссоциация COS , хотя некоторое количество серы может поступать также из нижних слоев атмосферы. Сера плавится при 386 К и парциальное давление ее пара составляет 10^5 Па при температуре 713 К, примерно соответствующей температуре поверхности Венеры. Таким образом, на уровне поверхности может существовать жидкая сера. Возможно, сера играет в венерианской атмосфере роль, аналогичную роли водяного пара в земной атмосфере, т. е. сера в существенной мере ответственна за поглощение солнечной радиации. Если отношение концентраций паров серы и CO_2 составляет в нижних слоях атмосферы около 10^{-5} , то это означает возможность образования облаков из конденсата серы, начиная с высоты примерно 46 км, что довольно близко соответствует положению нижней границы облаков по данным измерений освещенности на «Венере-8».

Регас и др. (см. [34]) осуществили интерпретацию спектров Венеры в области 1,05-мкм полосы углекислого газа и 0,8199-мкм линии водяного пара путем сравнения измеренных и расчетных спектров, основанную на использовании модели неоднородной, изотропно рассеивающей атмосферы с параметрами структуры, заимствованными из предварительных данных АМС «Маринер-5» и «Венера-4, -5, -6». Был получен следующий результат: если венерианские облака представляют собой большую толщу поглощаемой пыли, то их верхняя граница должна быть расположена выше уровня 90 гПа; если же они являются слоем поглощающего конденсата, то их верхняя граница находится выше 65 гПа. По своим рассеивающим свойствам верхняя часть облаков Венеры напоминает перистые или слоистые облака. Расчет поглощения в 0,8199-мкм линии водяного пара в предположении изотермической структуры 240 К выше уровня 250 гПа и ледяной природы облаков дал значения, намного превосходящие наблюдаемые, откуда можно сделать вывод, что облака Венеры не являются ледяными.

Поскольку пересмотр данных «Маринер-5» привел к существенному изменению структурных параметров атмосферы (новые данные свидетельствуют, в частности, о возможности образования

водного облака на уровне 58 км при отношении смеси водяного пара 10^{-2} , измеренном АМС «Венера»), Регас и др. предприняли ревизию интерпретации данных наземных измерений спектра атмосферы в полосе 1,05 мкм и линии водяного пара 0,8226 мкм (наблюдения выполнены 20—24 октября 1967 г. при фазовом угле 102°). В табл. 4.1 приведены данные, характеризующие модель пылевого облака при минимальной и максимальной высоте верхней границы облаков (ВГО).

Таблица 4.1
Параметры пылевого облака

Параметр	Минимальная высота ВГО	Максимальная высота ВГО
Давление на уровне ВГО, Па	100	1
Оптическая плотность при изотропном рассеянии	4400	1290
Длина пробега фотонов на уровне $0,2 \cdot 10^5$ Па, км	0,65	1,5

Как видно, подобные облака должны обладать гигантской оптической плотностью. Альбеда однократного рассеяния составляет в рассматриваемом случае 0,9966 и полностью исключает возможность прохождения солнечной радиации через облака (это, несомненно, противоречит тем данным измерений освещенности на АМС «Венера-8», которые будут рассмотрены далее). Если учесть влияние анизотропности рассеяния, то длина пробега фотонов оказывается варьирующей в пределах 0,11—0,25 км, что примерно соответствует длине пробега фотонов в земных перистых и слоистых облаках.

Результаты расчетов для чисто рассеивающих облаков из конденсата с оптической плотностью 9,9 приведены в табл. 4.2. Эта таблица показывает возможный диапазон высот, в пределах которого могут существовать облака из конденсата. Сопоставление табл. 4.1 и 4.2 приводит к выводу, что длина пробега фотонов в обоих случаях оказывается примерно одинаковой.

Таблица 4.2
Параметры облачного слоя из конденсата

Параметр	Минимальная высота ВГО	Максимальная высота ВГО
Давление на уровне ВГО, Па	3 400	100
Давление на уровне НГО, Па	47 000	91 000
Температура на уровне НГО, К	282	330
Длина пробега фотона на уровне $0,2 \cdot 10^5$ Па, км	0,8	1,6

Данные наблюдений в линии 0,8226 мкм согласуются с расчетами, если предположить изменчивость объемного отношения смеси водяного пара в пределах $(1,5 \dots 4,8) \cdot 10^{-5}$, и допускают возможность существования верхнего слоя облачности из водного раствора соляной кислоты в слое 10—16 гПа (оптическая плотность облака равна 0,5), т. е. в зоне холодной «ловушки» на высоте 80 км, обнаруженной по пересмотренным данным «Маринер-5». Под верхним слоем находится более мощный нижний слой облаков неизвестного состава.

Регас и др. подвергли критике двухслойную модель облаков, подобную предложенной Хантом, так как она налагает слишком сильные ограничения либо на природу переноса излучения в верхней тропосфере облаке, либо на природу переноса излучения в верхней тропосфере Венеры. Последнее определяется тем, что такая двухслойная модель предполагает слишком малую длину свободного пробега фотонов при анизотропном рассеянии, равную 0,01 км на уровне $2 \cdot 10^4$ Па, что соответствует случаю земных кучевых облаков и является маловероятным. Таким образом, согласно [34], к наилучшему соответствию спектроскопическим данным приводит гипотеза о наличии облака из раствора соляной кислоты, расположенного либо над совокупностью конденсационных облаков, либо над протраженным пылевым облаком. Возможна также комбинация слоев облачности из конденсата и пыли. Однако рассмотренные выше и другие более убедительные результаты опровергают такой вывод.

Принн [160] при исследовании проблемы состава облаков Венеры исходил из того, что, согласно имеющимся данным, верхняя часть видимых облаков Венеры имеет температуру около 250 К, а их верхняя граница располагается вблизи уровня 200 гПа (63 км), но четко зафиксировать ее местоположение трудно. Измерения поляризации отраженного облаками солнечного света привели к оценке радиуса частиц примерно 1,1 мкм и показателя преломления 1,44 на уровне 50 гПа. По-видимому, перемежающиеся и слабые дымки, замеченные на фотографиях в ультрафиолетовом свете, находятся на уровне около 10 гПа. В связи с обнаружением в атмосфере Венеры водяного пара и соляной кислоты в работе [160] высказано предположение, что верхний слой дымки состоит из капель концентрированной соляной кислоты, которые могут образовываться при температуре около 198 К, соответствующей давлению 20 гПа. При этом предполагалось, что отношение смеси водяного пара составляет 10^{-4} на уровне верхней границы облаков. Однако недавние наблюдения показали, что даже внутри основной толщи облаков отношение смеси составляет, по-видимому, всего 10^{-6} . В таком случае соляная кислота и водяной пар могут конденсироваться лишь выше 38 км (давление 1 гПа, температура 160 К) в форме ледяных кристаллов и твердой соляной кислоты $\text{HCl} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$.

Наличие очень малого отношения смеси водяного пара означает либо преобладание подобных условий во всей атмосфере планеты, либо существование высокогигроскопичного вещества: облаков, обуславливающего низкое содержание водяного пара в видимой части атмосферы Венеры. Ранее уже отмечалось, что капли соляной кислоты имеют показатель преломления, равный 1,44, а предположение об облаках, состоящих из таких капель, согласуется с данными измерений инфракрасного спектра Венеры. Парциальное давление водяного пара над подобными каплями настолько мало, что позволяет объяснить отношение смеси порядка 10^{-6} .

Россов [172—174] осуществил расчеты с целью оценки влияния процессов коагуляции, седиментации и турбулентного перемешивания на наблюдаемую микроструктуру верхней части венерианских облаков. Эти расчеты показали, что если массовое отношение смеси водяного пара в облаках меньше 10^{-6} при температуре 250 К, а коэффициент турбулентного перемешивания превосходит 10^6 см²/с, то влияние коагуляции незначительно. В этом случае наблюдаемая микроструктура идентична первоначальной, микроструктуре, обусловленной соответствующими процессами, ответственными за образование капель. Показано, что согласно моделям облаков с образованием капель вблизи верхней границы облаков (например, фотохимической модели) должна формироваться микроструктура, соответствующая наблюдаемой, без последующей трансформации микроструктуры процессами коагуляции. Однако образование капель серной кислоты в земной стратосфере показывает, что это невозможно. Кроме того, оказывается, что ни частицы метеоритной пыли, ни пылевой аэрозоль, возникающий при сдувании пыли с поверхности планеты, не обеспечивают достаточного количества ядер конденсации, необходимого для объяснения наблюдаемой концентрации капель. Если, однако, капли формируются вблизи нижней границы облаков, наблюдаемую микроструктуру облаков можно полностью объяснить взаимодействием коагуляции и динамики при коэффициенте перемешивания, равном $5 \cdot 10^5$ см²/с.

Спектроскопические наблюдения привели к выводу об очень низкой концентрации серосодержащих газов в венерианской атмосфере. Это обусловлено быстрой фотохимической диссоциацией газов (прежде всего карбонилсульфида COS) в верхней атмосфере (время диссипации 10^3 — 10^5 с), которая ведет к образованию аэрозоля из капель серной кислоты путем фотоокисления SO₂ в присутствии O₂ и малых количеств H₂O.

Таким образом, можно предположить, что видимые облака Венеры представляют собой протяженную дымку из капель серной кислоты, шкала высот для которой превосходит шкалу высот для газообразной атмосферы. Согласно Янгу [221], наилучшее согласие с измеренным инфракрасным эмиссионным спектром Венеры получается, если предположить, что частицы облаков состоят из водного раствора серной кислоты, концентрация которого

несколько превосходит 75 %. В таком случае отношение смеси водяного пара должно составлять 10^{-6} (нижний предел), а отношение смеси карбонилсульфида и сернистого газа — 10^{-7} (верхний предел), что хорошо согласуется с данными наблюдений. В слое облачности не должно быть разрывов, если только условия динамики атмосферы не вызывают перемешивания всего слоя облаков за время, меньшее, чем несколько суток. При таких обстоятельствах отношение смеси водяного пара может увеличиться до 10^{-4} , а над основной толщей облаков может образоваться тонкий слой дымки из капель серной кислоты. Присутствие серы в частицах облаков можно в дальнейшем обнаружить путем измерения рентгеновской флуоресценции с АМС.

4.3.2. Поляризация солнечного света, отраженного облаками

Одним из наиболее эффективных методов изучения размера частиц облаков, определения их оптических свойств (комплексного показателя преломления) и состава является интерпретация результатов измерений поляризации Венеры (см. В. В. Соболев [66, 67], Коффин [87], Кавабата, Хансен [120]).

Анализ данных о поляризации света, отраженного всем диском Венеры, позволил оценить показатель преломления, средний размер частиц и положение уровня внутри облачного покрова Венеры, которому соответствует оптическая плотность $\tau=1$. Естественно, что более обширная информация может быть получена по данным измерений поляризации для различных участков диска планеты. Это касается прежде всего определения локальных свойств облаков по данным об изменении поляризации в зависимости от фазового угла и длины волны. Наблюдения определенного участка диска при различных зенитных углах открывают возможности определения вертикального профиля концентрации частиц облаков по соотношению молекулярного рассеяния и рассеяния на частицах. Имеющиеся наземные наблюдения региональной поляризации на Венере малочисленны и обладают низким пространственным разрешением. Поэтому их можно использовать лишь для определения параметров двухслойной модели атмосферы, состоящей из слоя рэлеевского рассеяния, расположенного над полубесконечным слоем облаков.

Кавабата и Хансен [120] выполнили расчеты поляризации солнечного света, отраженного различными участками диска Венеры, для двухслойной модели атмосферы, состоящей из слоя рэлеевского рассеяния оптической плотности τ_R , расположенного над полубесконечным слоем облачности, характеризуемым отношением f_R коэффициентов рэлеевского и аэрозольного рассеяния. Частными случаями этой модели являются однородная атмосфера ($\tau_R=0$) и модель отражающего слоя ($f_R=0$).

Результаты расчетов показывают, что рэлеевский компонент поляризации обусловлен главным образом рассеянием внутри

облака, а не над облаком. Облака в их верхней части в действительности являются диффузной дымкой. Наблюдаемая с Земли облачность распространяется по крайней мере до уровня 10 гПа. Сопоставление с данными измерений поляризации приводит к выводу, что модель однородной атмосферы более адекватна, чем модель отражающего слоя. При этом средняя длина свободного пробега фотонов в видимой области спектра составляет около 5 км на уровне 50 гПа, что соответствует горизонтальной дальности видимости примерно 20 км (характерное значение длины пробега для земных облаков составляет 0,1 км или меньше). Счетная концентрация частиц облаков на уровне 50 гПа равна 30 см^{-3} . Можно предполагать, что отношение аэрозольной оптической плотности к рэлеевской увеличивается с глубиной в слое 7—300 гПа, поскольку аэрозольная шкала высот значительно меньше (2—3 км), чем газовая (5,2 км).

В работе Хансена и Ховенира (см. [34]) подведены итоги поляризационных исследований Венеры и предприняты сопоставления результатов теоретических расчетов степени поляризации с данными наблюдений, целью которых являлось определение размеров частиц облаков и их показателя преломления. Расчеты сделаны для облака, микроструктура (распределение частиц по размерам) которого задана формулой (4.1). Поскольку параметры a и b этой формулы можно рассматривать как эффективные значения радиуса частиц и изменчивости радиуса, обе эти величины являются основными параметрами, определяющими степень поляризации. Двумя другими важными параметрами являются показатель преломления n и коэффициент f_R , характеризующий вклад рэлеевского рассеяния (отношение коэффициентов рэлеевского и аэрозольного рассеяния). Фазовые кривые поляризации рассчитаны для трех длин волн λ , которым соответствуют следующие значения альбедо однократного рассеяния $\tilde{\omega}$, сферического альбедо планеты A и величины $\cos \varphi$ (φ — угол рассеяния), характеризующей индикатрису рассеяния:

λ мкм	0,365	0,55	0,99
$\tilde{\omega}$	0,98427	0,99897	0,99941
A	0,55	0,87	0,90
$\cos \varphi$	0,761	0,713	0,715

Расчеты Хансена и Ховенира показали, что поляризация на длине волны 0,55 мкм наиболее чувствительна к размеру частиц и достаточно сильно изменяется в зависимости от показателя преломления. На рис. 4.11 представлены результаты вычислений в сопоставлении с данными всех имеющихся наблюдений поляризации, иллюстрирующие изменчивость фазовых кривых поляризации в зависимости от размера частиц (и те и другие данные относятся ко всей освещенной части диска планеты). Максимум поляризации при $\alpha \approx 20^\circ$ отражает положение первичной радуги, а при $\alpha \approx 155^\circ$ соответствует наличию аномальной дифракции. Из

данных рис. 4.11 вытекает, что если показатель преломления $n=1,440 \pm 0,015$, то наилучшее согласие с результатами наблюдений имеет место при эффективном радиусе $a \approx 1,05 \pm 0,10$ мкм и изменчивости радиуса $b \approx 0,07 \pm 0,02$. Данные аналогичного со-

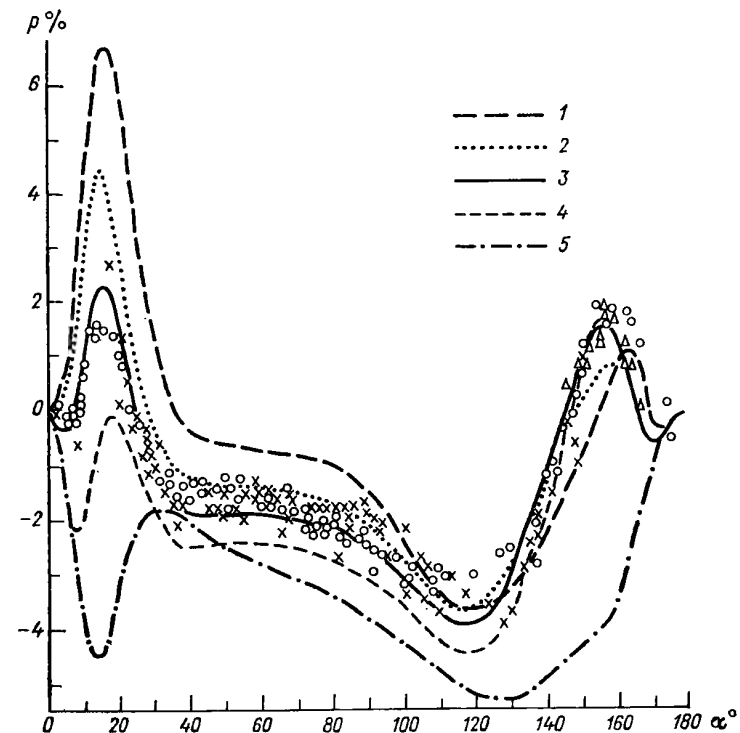


Рис. 4.11. Зависимость степени поляризации отраженной Венерой солнечной радиации на длине волны 0,55 мкм от фазового угла по данным измерений (значки) и расчетов (кривые).
 $n=1,44$; $b=0,07$; $f_R=0,045$; 1) $a=1,5$ мкм; 2) $a=1,2$ мкм; 3) $a=1,05$ мкм; 4) $a=0,9$ мкм; 5) $a=0,6$ мкм.

поставления для других длин волн подтверждают этот вывод относительно микроструктуры облаков.

Поскольку показатель преломления может изменяться в зависимости от длины волны, были сделаны расчеты с целью проанализировать чувствительность фазовых кривых к показателю преломления на всех рассматриваемых длинах волн. При длинах волн около 1 мкм наблюдаемая поляризация Венеры отрицательна при всех фазовых углах, что является следствием сравнимости размеров частиц и длины волны в этом диапазоне длин волн. При $\lambda=0,99$ мкм фазовые кривые поляризации очень чув-

ствительны как к размеру частиц, так и к показателю преломления (рис. 4.12). Поэтому измерения на этой длине волны очень информативны для определения соответствующих параметров и приводят, в частности, к $n=1,430\pm 0,015$.

В ультрафиолетовой области спектра ($\lambda=0,365$ мкм) поляризация менее чувствительна к микроструктуре облака, чем в види-

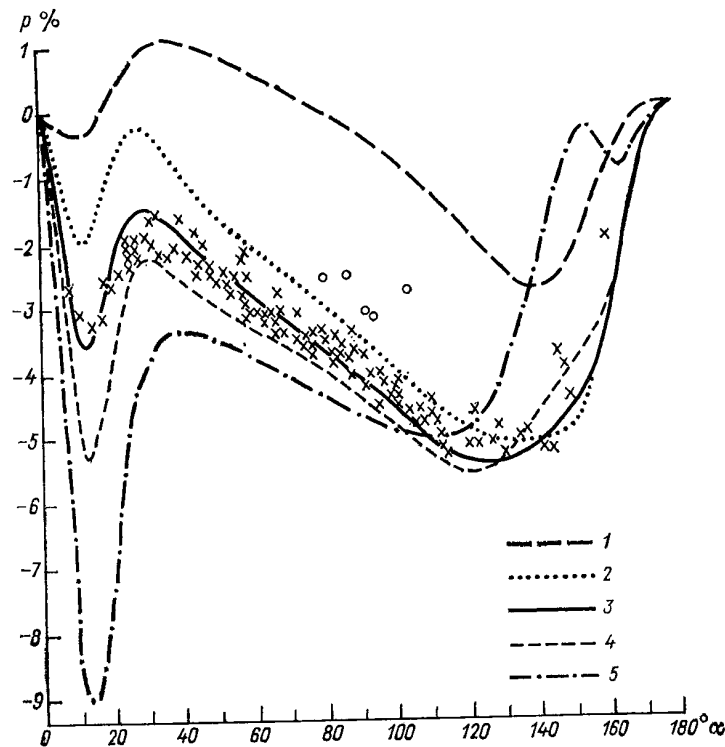


Рис. 4.12. Зависимость степени поляризации отраженной Венерой солнечной радиации на длине волны 0,99 мкм от фазового угла по данным измерений (значки) и расчетов (кривые).

$b=0,7$; 1) $n=1,33$ ($a=0,8$ мкм); 2) $n=1,40$ ($a=1$ мкм); 3) $n=1,43$ ($a=1,05$ мкм); 4) $n=1,45$ ($a=1,05$ мкм); 5) $n=1,50$ ($a=1,2$ мкм).

мом и ближнем инфракрасном диапазоне, но позволяет весьма точно определить показатель преломления благодаря наличию сильного максимума поляризации в зоне первичной радуги. К наилучшему соответствию с наблюдениями приводит $n=1,460\pm 0,015$. Наблюдения поляризации в ультрафиолетовой области спектра информативны также для оценки вклада рэлеевского рассеяния в облаках и над облаками. Степень поляризации существенно зависит здесь от величины f_R и сравнение расчетов с наблюдениями приводит к наилучшему согласию при $f_R=0,045$. Хансен

и Ховенир показали, что для модели однородной атмосферы давление внутри облака на глубине, соответствующей единичной оптической плотности, $P_1=1,16 f_R$, т. е. составляет около 50 гПа. Выполненный ими анализ результатов наблюдений, относящихся к иным длинам волн того же диапазона 0,34—1 мкм, чем три рассмотренные выше, подтвердил полученные выводы. Имеются также некоторые данные наблюдений для интервала 1,25—3,6 мкм, но они немногочисленны и недостаточно надежны. Существенно, однако, что неизменно наблюдалась отрицательная поляризация при всех фазовых углах для длин волн 1,25; 1,65 и 2 мкм, преимущественно положительная поляризация для $\lambda=2,2$ мкм и только положительная поляризация для $\lambda=3,6$ мкм. Именно такого хода следует ожидать от спектральной зависимости поляризации для частиц с эффективным радиусом около 1 мкм. Следовательно, и эти данные находятся в согласии со сделанными выше выводами.

Поскольку интерпретация поляризационных наблюдений определенно свидетельствует о том, что показатель преломления частиц венерианских облаков составляет $1,440\pm 0,015$ при $\lambda=0,55$ мкм, варьируя от $n\approx 1,46$ для $\lambda=0,365$ мкм до $n\approx 1,43$ при $\lambda=0,99$ мкм, это дает основания для суждений относительно возможного состава облаков. Стремясь использовать для этой цели полученную из наблюдений спектральную зависимость показателя преломления, Хансен и Ховенир показали, что в видимой области спектра $\frac{n^2+1}{n^2-1} \sim \lambda^2$. На рис. 4.13 данные наблюдений

представлены в соответствующей системе координат (с указанием возможной погрешности этих данных) и сопоставлены с результатами, полученными путем расчета при различных предположениях о химическом составе частиц облаков.

Обращает на себя внимание удивительная однородность микроструктуры и оптических свойств (показателя преломления) венерианских облаков, а также малая изменчивость размеров частиц, совершенно противоположные тому, что наблюдается в земных облаках. Так, например, параметр b для земных облаков варьирует от $\sim 0,05$ до $\sim 0,40$. Однако для стратосферного слоя аэрозоля (слоя Юнге), расположенного на уровне 50 гПа, параметр $b\approx 0,06 \dots 0,08$. Это позволяет усмотреть определенную аналогию между верхней частью облачного покрова Венеры, ответственной за поляризацию света (поляризация определяется главным образом влиянием многократного рассеяния в слое оптической плотности $\tau\approx 1$), и земным стратосферным слоем аэрозоля, для которого также характерно большое содержание серной кислоты (см. [31]).

В связи с обнаружением сернокислотного состава облаков Венеры Принн [63, 144, 162—164] детально проанализировал химические превращения серы в зоне облаков, рассмотрел вероят-

ные циклы серы и кислорода и разработал на этой основе фотохимическую модель формирования венерианских облаков, состоящих из фотохимически продуцируемой серной кислоты и меньшего количества поглощающей ультрафиолетовую радиацию серы. На рис. 4.14 изображена предложенная Принном схема циклов серы и кислорода в атмосфере Венеры (выше пунктирной линии, соответствующей высоте около 67 км, располагается зона

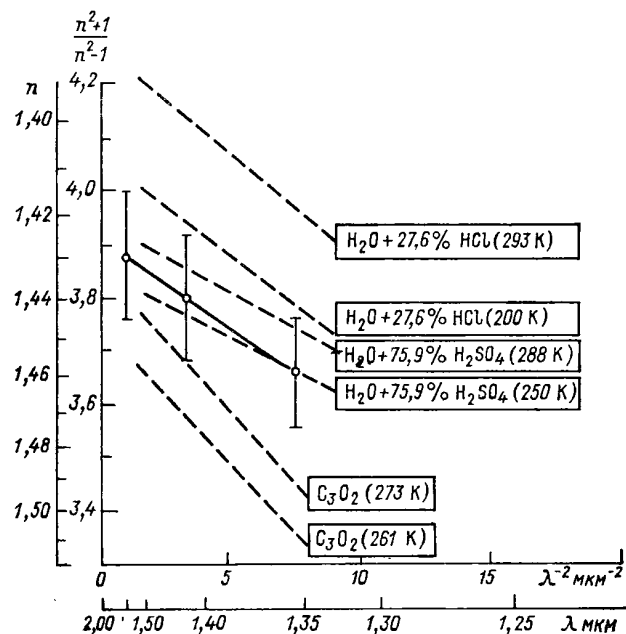
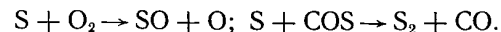


Рис. 4.13. Зависимость показателя преломления от длины волны по данным наблюдений поляризации Венеры и расчетов по различным моделям химического состава облаков.

фотохимических реакций). Основную роль играют два конкурирующих механизма удаления атомов серы в атмосфере над облачным покровом:



Первая из реакций, представляющая собой механизм стока молекулярного кислорода, требует наличия приемлемой концентрации O_2 и приводит к продукции серной кислоты. Вторая реакция происходит в слое с малым содержанием кислорода и обуславливает образование S_2 . Анализ условий осуществления обеих реакций приводит к выводу, что области ультрафиолетовых потемнений Венеры являются зонами недостатка кислорода, где про-

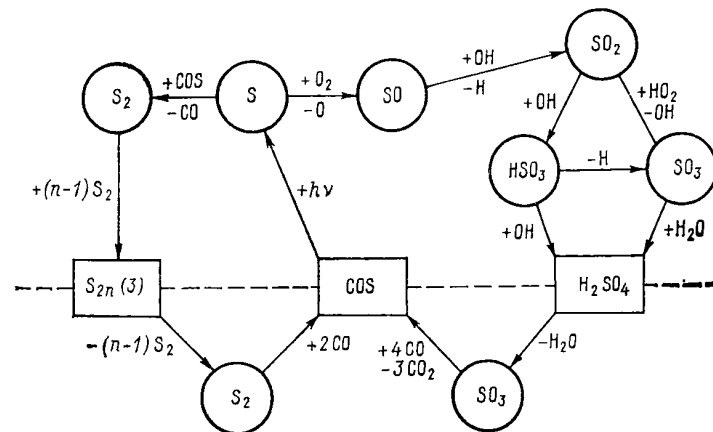


Рис. 4.14. Циклы серы и кислорода в атмосфере Венеры.

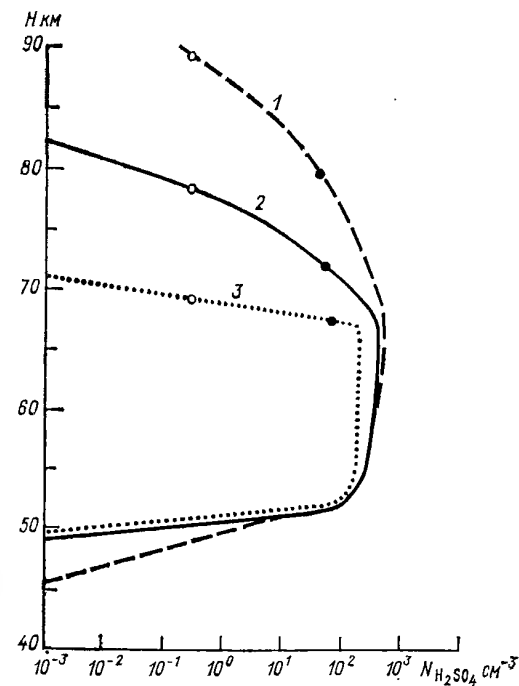


Рис. 4.15. Модели вертикального распределения концентрации капель серной кислоты, соответствующие различным значениям коэффициента турбулентного перемешивания K_i (cm^2/s) на высотах больше 67 км (K_1), 57—67 км (K_2) и меньше 57 км (K_3).

1) $K_1=7 \cdot 10^4$, $K_2=2 \cdot 10^5$, $K_3=10^6$;
2) $K_1=10^4$, $K_2=5 \cdot 10^4$, $K_3=10^5$;
3) $K_1=10^3$, $K_2=10^4$, $K_3=10^5$. За-
черненные кружки отмечают
высоту, которой соответствует
 $\tau=1$ при $r=1,05$ мкм; неза-
черненные — высоту, которой со-
ответствует $\tau=0,006$ при $r=$
 $-1,05$ мкм.

дуцируется значительное количество поглощающей ультрафиолетовую радиацию серы. Облака ярких областей состоят только из серной кислоты.

С учетом кинетики упомянутых и сопутствующих им реакций Принн [163] построил три модели вертикального профиля концентрации капель серной кислоты в облаке при различных предположениях о вертикальном профиле коэффициента турбулентного перемешивания (рис. 4.15). Как видно, наилучшее согласие с данными наблюдений обеспечивает модель, рассчитанная при коэффициентах перемешивания, равных 10^4 , $5 \cdot 10^4$ и 10^5 см²/с для атмосферных слоев на высотах больше 67 км, 57—67 км и меньше 57 км.

Поскольку наиболее вероятно, что облака Венеры состоят из капель концентрированного водного раствора серной кислоты, следует ожидать более высокой концентрации водяного пара под облаками, чем над облаками. Единственно возможная дистанционная методика обнаружения водяного пара в глубоких слоях венерианской атмосферы состоит в интерпретации данных о тепловом радиоизлучении. В связи с этим Россов и Саган (см. [172]) рассчитали спектральную зависимость радиояркостной температуры всего диска Венеры в диапазоне 0,1—10 см и результаты расчетов сопоставили с данными наземных измерений.

В основу расчетов положена модель атмосферы Венеры, состоящей на 97 % из углекислого газа, причем остальные 3 % приходятся на долю азота. Поскольку капли облаков малы по сравнению с длиной волны радиоизлучения, можно ограничиться учетом лишь поглощения жидкой фазой облаков, пренебрегая рэлеевским рассеянием. Вычисления вещественной и мнимой частей комплексного показателя преломления воды и серной кислоты сделаны по формулам Дебая и в случае воды обнаруживают на длинных волнах существенную температурную зависимость. По этой причине оптическая плотность облаков на длинных волнах определяется влиянием холодной верхней части облака, хотя основная масса воды сосредоточена в его более теплых слоях. Вода при температуре более 273 К перестает быть эффективным поглотителем.

Примерно то же самое относится к серной кислоте, температурная зависимость компонентов комплексного показателя преломления которой аналогична. Учет поглощения растворами серной кислоты осложняется появлением и существенным влиянием ионов H_2O^+ и H_2SO_4^- , обуславливающих уменьшение поглощения. Поэтому для моделирования диэлектрических свойств раствора серной кислоты использованы два экстремальных предположения: 1) поглощение каплями раствора представляет собой суперпозицию поглощения, обусловленного серной кислотой и водой (полное поглощение); 2) пары молекул воды и серной кислоты не поглощают вообще; так как моногидрату соответствует 80,5 %-ная концентрация серной кислоты, то это означает, что при концентрации меньше 80,5 %, поглощают лишь избыточные моле-

кулы водяного пара, а в противоположном случае — молекулы серной кислоты (эффективное поглощение).

Анализ возможных моделей сернокислотных облаков привел к следующим выводам (рис. 4.16): 1) концентрация капель должна значительно изменяться в зависимости от высоты; 2) если $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{SO}_4 \leq 10$, то отношение смеси водяного пара должно

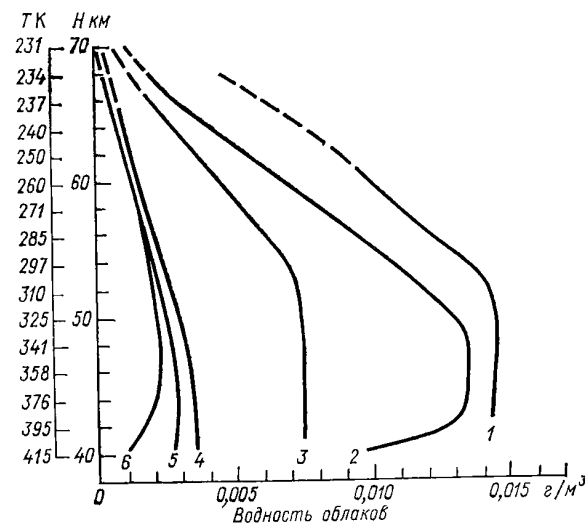


Рис. 4.16. Вертикальные профили водности для различных моделей венерианских облаков.

Кривая	1	2	3	4	5	6
H_2O	10^{-3}	$4 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	10^{-3}	$4 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}
H_2SO_4	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$

быть существенно больше в глубоких слоях, чем над облаками. Здесь H_2O и H_2SO_4 — отношение смеси воды во всех фазах, которое считается постоянным, и жидкой серной кислоты. В табл. 4.3 воспроизведены значения верхних пределов H_2O и H_2SO_4 , полученные путем сопоставления данных расчетов и измерений.

Все рассмотренные результаты согласуются с верхними пределами $\text{H}_2\text{O} \cong 10^{-3}$ и $\text{H}_2\text{SO}_4 \cong 10^{-5}$, что полностью исключает возможность существования на Венере водных облаков. Если исходить из 97 %-ного содержания углекислого газа и модели полного поглощения, то с учетом данных микроволновых, спектроскопических и поляризационных измерений наиболее вероятными оказываются $\text{H}_2\text{O} = 2 \cdot 10^{-4}$ и $\text{H}_2\text{SO}_4 = 9 \cdot 10^{-6}$. Значения общего содержания суммарного конденсата и жидкой воды в облаках при

Таблица 4.3

Верхние пределы отношения смеси воды и серной кислоты, полученные на основе сравнения данных измерений и расчетов для моделей полного поглощения (ПП) и эффективного поглощения (ЭП)

	$\sigma_{\text{H}_2\text{O}}$	$\sigma_{\text{H}_2\text{SO}_4}$
1,3-см излучение H_2O	$5 \cdot 10^{-3}$	
Радиорефракционные данные АМС «Маринер-5»:		
ПП	$4 \cdot 10^{-4} \dots 4 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-6} \dots 9 \cdot 10^{-6}$
ЭП	$4 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-6}$
Радиолокационные данные (97 % CO_2):		
ПП	$4 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-6}$
ЭП	$4 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$
Микроволновые данные		
Янсен и др. (90 % CO_2):		
ПП	10^{-4}	$9 \cdot 10^{-6}$
ЭП	10^{-4}	$4,5 \cdot 10^{-5}$
Поллак и Моррисон (90 % CO_2):		
ПП	10^{-2}	$4,5 \cdot 10^{-4}$
ЭП	10^{-2}	10^{-3}
Поллак и Моррисон (97 % CO_2):		
ПП	$2 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-6}$
ЭП	$2 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$

этом равны соответственно 0,1 и 0,01 г/см². Такой состав венерианских облаков (при учете толщи углекислой атмосферы 90×10^5 Па) согласуется с гипотезой о парниковом эффекте как факторе, определяющем высокую температуру поверхности Венеры.

4.3.3. Уходящее тепловое излучение

Важным источником информации о вертикальной структуре венерианских облаков являются результаты измерений уходящего инфракрасного теплового излучения [30—34, 128—131]. При помощи установленного на АМС «Маринер-10» двухканального инфракрасного радиометра (ДИКР) были выполнены измерения углового распределения уходящего теплового излучения по диску Венеры в спектральных интервалах 8—14 мкм (канал 11 мкм) и 35—55 мкм (канал 45 мкм). Углы зрения ДИКР составляют 0,5 и 1,1° для первого и второго каналов соответственно, что обеспечивает линейное разрешение около 100 и 200 км. Осуществленный Тэйлором [191—200] анализ результатов измерений (рис. 4.17) показал, что Венера примерно на 20 К теплее на длине волны 45 мкм, чем 11 мкм. С учетом имеющихся данных о вертикальном профиле температуры можно заключить, что тепловое излучение в 45-мкм канале генерируется преимущественно слоем атмосферы, расположенным на 5 км ниже «слоя излучения» для 11-мкм канала.

Такой вывод может показаться парадоксальным, если учесть, что оба основных газовых поглощающих компонента атмосферы — углекислый газ и водяной пар — значительно сильнее поглощают в интервале 35—55 мкм, чем 8—14 мкм. Упомянутый вывод означает, однако, что пропускание атмосферы определяется прежде

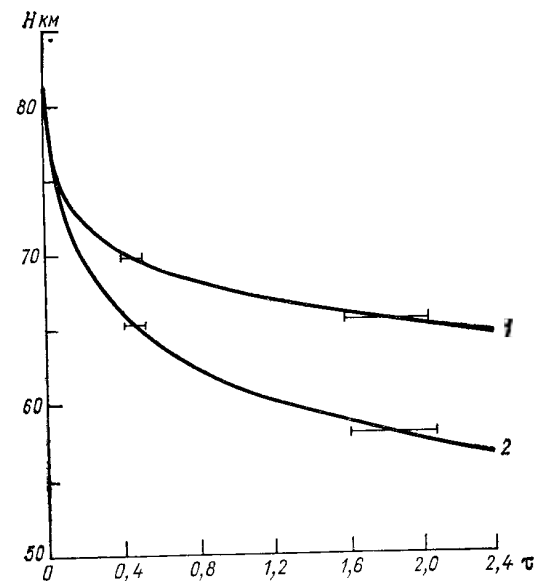


Рис. 4.17. Зависимость оптической плотности от высоты на длинах волн 11 мкм (1) и 45 мкм (2).

всего оптическими свойствами облаков, прозрачность которых выше в области более длинных волн. В связи с этим Тэйлор [191] решил задачу восстановления вертикального профиля оптической плотности облаков в диапазоне высот 60—80 км по данным ДИКР при заданном вертикальном профиле температуры. Такого рода обратная задача решена на основе итерационной методики Шахина.

Рассматриваемые измерения приводят к монотонному возрастанию оптической плотности с глубиной, не позволяя выявить вертикальную структуру облачного покрова. В работе [191] построена простейшая модель состава стратосферы Венеры в предположении, что венерианские облака состоят из капель 75 %-ного водного раствора серной кислоты радиусом 1,1 мкм (рис. 4.18). Расчет поперечников поглощения и рассеяния капель по формулам Ми показал, что на длине волны 45 мкм поперечник рассеяния составляет только 3 % поперечника поглощения.

Данным измерений при помощи ДИКР наилучшим образом соответствует модель, определяющая убывание концентрации капель с высотой до нуля вблизи 80 км и повышение отношения смеси водяного пара с высотой выше этого уровня. Общее содержание водяного пара в толще атмосферы выше уровня 10 гПа составляет примерно 40 мкм осажденной воды.

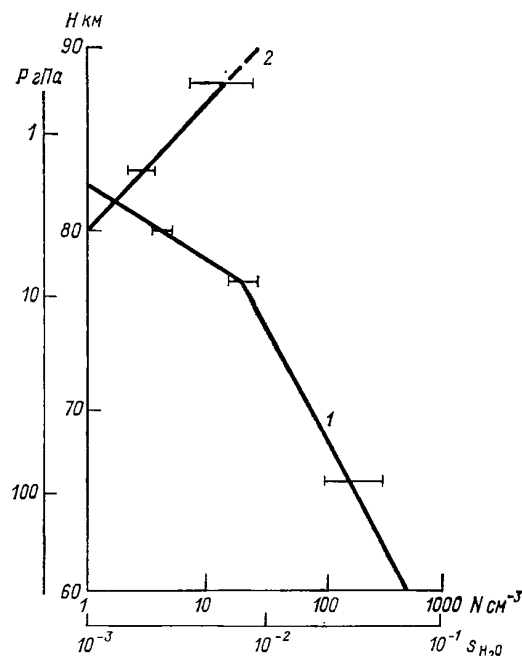


Рис. 4.18. Простейшая модель верхней атмосферы Венеры, согласующаяся с данными измерений уходящего теплового излучения.

1 — концентрация частиц облаков; 2 — объемное отношение смеси водяного пара.

К. Я. Кондратьев и Н. И. Москаленко [130] выполнили расчеты количественных характеристик поля излучения в атмосфере Венеры на основе использования результатов специальных лабораторных измерений спектроскопических параметров оптически активных компонентов Венеры, как газовых (CO_2 , H_2O , CO , HCl , N_2 , SO_2), так и аэрозольных. В случае газовых компонентов особое внимание уделено учету температурной зависимости и индуцированного поглощения. Оптические параметры облаков вычислены для различных моделей их химического состава и микроструктуры. В работе [130] приведены результаты сравнения вычисленных вертикальных профилей эффективных потоков коротковолновой и длинноволновой радиации с наблюдаемыми в слое облачности; результаты хорошо согласуются. Расчетные значения коротковол-

нового баланса поверхности планеты Венеры равны 17—19 Вт/м², а поглощенной атмосферой солнечной радиации — 140—150 Вт/м². Сильная ИК непрозрачность венерианской атмосферы определяет малые значения эффективного излучения поверхности, равные 7—10 Вт/м².

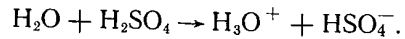
Шофилд и Тэйлор [178] выполнили расчеты уходящей длинноволновой радиации (УДР) для северного полушария Венеры при заданных для 120 точек вертикальных профилях температуры, отношения смеси водяного пара и характеристик облачного покрова, которые восстановлены по данным 6-канальных (220, 667, 679, 727, 764 и 872 см⁻¹) измерений УДР при помощи ИК радиометра, установленного на орбитальном аппарате «Пионер—Венера», за 72 сут. В качестве основных оптически активных компонентов атмосферы учтены углекислый газ, сернокислотные облака и водяной пар, причем вклад последнего оказался несущественным. Главными источниками погрешностей расчетов являются ошибки восстановления входных параметров и недостаточная надежность данных о спектральной прозрачности (функциях пропускания) облаков. Получены оценки чувствительности рассчитанных значений УДР к выбору моделей облачного покрова, погрешностям измерений и калибровок.

Анализ результатов сделанных в работе [178] вычислений показал, что в течение рассматриваемого периода УДР слабо зависит от долготы и широты, за исключением зоны высокоширотного полярного «воротничка», где значения УДР оказываются аномально низкими. Осреднение полученных значений УДР по северному полушарию за 72 сут привело к значению, равному $(157,0 \pm 6,9)$ Вт/м², что соответствует эффективной температуре $(229,4 \pm 2,5)$ К. Если это значение репрезентативно для всей планеты и наблюдается среднеглобальный нулевой радиационный баланс, то альbedo Венеры оказывается равным $0,762 \pm 0,11$, что согласуется (в пределах погрешностей) с последними данными наблюдений, но несколько ниже значений, найденных ранее. Подобное расхождение связано главным образом с неточностями предшествующих расчетов. Поскольку использованный период осреднения (72 сут) превосходит характерное время динамической и радиационной релаксации на уровне верхней границы облаков, полушария Венеры выглядят на всех длинах волн симметрично и на Венере нет годового хода климата, полученные результаты можно рассматривать как глобально репрезентативные. Однако для окончательных выводов необходимы более надежные данные об альbedo Венеры.

Важные новые результаты дал выполненный В. М. Линкиным и др. [49] анализ ИК данных АМС «Венера-15 и -16». Предварительное рассмотрение этих данных привело к следующим выводам: 1) в северном полушарии имеются три характерные области: низкие широты (40—60°), где яркостные температуры (ЯТ) и потоки

уходящего излучения постоянны; «холодный пояс» (60—75°, не замкнут по широте) с большими вариациями ЯТ; «теплая полярная шапка» (в полосе широт больше 75°) с «горячими пятнами»; 2) тепловая асимметрия на широте более 60° отсутствует; 3) горячие пятна, возможно, — парные; 4) холодный пояс не вращается вместе с атмосферой.

Итак, анализ данных о составе и структурных параметрах атмосферы Венеры и в особенности результатов поляризационных измерений привел к выводу, что венерианские облака состоят из капель концентрированного водного раствора серной кислоты. Янг [221] показал, что этот вывод позволяет объяснить сухость атмосферы Венеры, обусловленную сильно экзотермической реакцией



Так как растворы серной кислоты имеют низкую температуру замерзания и способны переохлаждаться, естественно предполагать, что облака состоят из капель раствора.

Предположению о сернокислотном составе капель при концентрации серной кислоты 70—75 % хорошо соответствует полученное по данным измерений поляризации значение коэффициента преломления, равное 1,44. Расчеты спектра теплового излучения облака, состоящего из капель серной кислоты, хорошо согласуются с данными наблюдений, обнаружившими полосу при 11,2 мкм и сильную черноту планеты вблизи 4 мкм. Значительная изменчивость спектров при концентрации более 85 % исключает возможность столь высокой концентрации серной кислоты, тогда как низкая влажность свидетельствует о том, что концентрация не должна быть существенно меньше 75 %.

Небольшая примесь HF, обуславливающая понижение точки замерзания и уменьшение показателя преломления, может сделать допустимой концентрацию серной кислоты, равную (80±5) %. Это одновременно может объяснить, почему содержание HCl в стратосфере Венеры в 40 раз больше, чем содержание HF. Обычно гипотеза о водной природе облаков отвергалась на том основании, что с ее помощью нельзя объяснить желтый цвет Венеры, обусловленный поглощением в ультрафиолетовых и голубых лучах. Это может быть отнесено и к сернокислотным облакам. По мнению Янга [221], следует, однако, считать, что упомянутое поглощение обусловлено каким-то малым компонентом облаков, наличие которого и объясняет контрасты облачности в ультрафиолетовых лучах.

Сравнительная монодисперсность венерианских облаков свидетельствует о незначительности влияния процесса коагуляции капель. Если учесть также ничтожно малое парциальное давление паров серной кислоты при температуре 250 К (отношение смеси при наличии капель 75 %-ной концентрации составляет 10⁻¹³), то становится ясно, что на Венере исключена возможность быстрого формирования и рассеивания облаков в результате фазовых пре-

вращений и коагуляции, подобных наблюдаемым на Земле. Очень малая изменчивость температуры верхней границы облаков указывает, по-видимому, на существование почти постоянного конвективного переноса тепла в вертикальном направлении, балансирующего поглощенную солнечную радиацию. Тот факт, что верхняя граница слоя конвекции соответствует оптической плотности вышележащей толщи атмосферы, равной примерно единице, свидетельствует о том, что над зоной конвекции происходит теплоотдача в космос за счет излучения. В результате предварительной обработки данных измерений вращательной температуры не обнаружено различий средней температуры, соответствующих ультрафиолетовым контрастам яркости, но выявлена более сильная изменчивость температуры для участков потемнений.

4.4. Прямые измерения с АМС «Венера»

Исключительно важное значение для анализа вертикальной структуры облачного покрова и условий формирования парникового эффекта имели измерения освещенности при помощи установленного на АМС «Венера-8» фотометра (сернисто-кадмиевое фотоспротивление), который мог функционировать при температуре 500 °С и давлении до 10⁷ Па. С помощью этого фотометра впервые была измерена освещенность от верхней полусферы в интервале 0,5—0,8 мкм на различных высотах в атмосфере Венеры в процессе парашютного спуска АМС (парашют занимал около 1 % поля зрения фотометра) 22 июля 1972 г. Обработка данных измерений была выполнена В. С. Авдеевским и др. [2—4] с учетом температурной зависимости чувствительности фотометра (по данным предполетной калибровки). Результаты бортовой калибровки фотометра свидетельствовали о повышении его чувствительности в полете, что потребовало введения поправки, равной 12 %. Погрешность измерений светового потока составляла примерно ±30 %.

Вертикальный профиль освещенности E в диапазоне высот 0—50 км (рис. 4.19) свидетельствует о резком изменении освещенности на высоте около 32 км. Выше этого уровня наблюдается гораздо более сильное увеличение освещенности с высотой, что позволяет считать, что вблизи высоты 32 км расположена нижняя граница облачного слоя. Высота Солнца над горизонтом в момент измерений составляла (5,5±2,5)°, что соответствует внеатмосферной освещенности E_0 (с учетом спектральной чувствительности фотометра), равной (65±35) Вт/м² (используя последние данные о внеатмосферном спектральном распределении солнечной радиации, Лацис и Хансен [140] получили (55±25) Вт/м²). Поскольку освещенность, измеренная на высоте около 48,5 км, составила примерно 10 Вт/м², это означает, что имело место ослабление света вышележащим слоем атмосферы примерно в 7 раз (по данным

[140] — в 5 раз). Освещенность уменьшалась еще в три раза в слое 50—32 км и снова в три раза — в слое между уровнем 32 км и поверхностью.

Таким образом, данные измерений освещенности свидетельствуют о вертикальной неоднородности атмосферы. Верхней точке измерений (48,5 км) соответствуют температура 329 К и давление $1,09 \cdot 10^5$ Па. Высота верхней границы облаков на уровне, где опти-

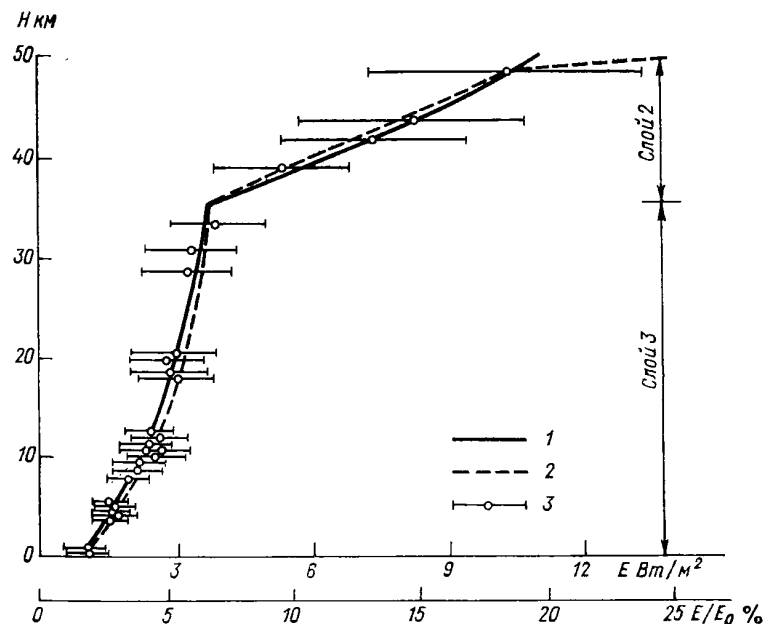


Рис. 4.19. Вертикальный профиль освещенности от верхней полусферы.

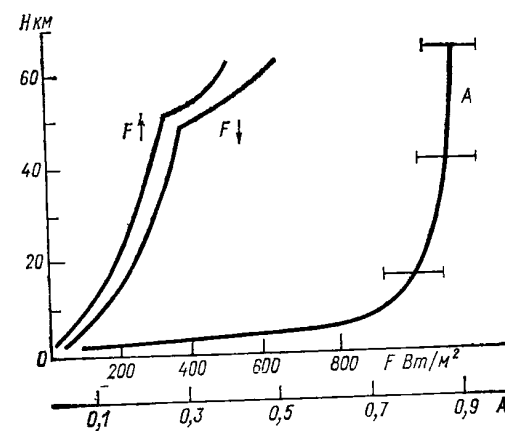
1 и 2 — результаты расчетов для моделей 1 и 2 (см. табл. 4.4); 3 — данные измерений АМС «Венера-8».

ческая плотность равна единице, соответствует давлению (50 ± 25) гПа (согласно Хансену и Ховениру). В рассматриваемом случае $P=50$ гПа на высоте около 68 км (см. [140]). Ослабление солнечной радиации максимально в слое между верхней границей облаков (65—70 км) и высотой около 48 км и минимально в слое атмосферы, расположенном ниже 32 км.

Для исследований светового режима в атмосфере и на поверхности Венеры на СА автоматических станций «Венера-9» и «Венера-10» был установлен прибор, способный длительно выдерживать воздействие температур до 500°C , давлений до 10^7 Па и большие перегрузки (В. С. Авдеевский и др. [3, 4]). Прибор состоит из датчика, установленного снаружи и имеющего собственную систему теплозащиты, и электронного блока, находящегося в приборном отсеке СА. Датчик имеет три группы чувствительных элементов (три сернисто-кадмиевых фотосопротивления, фотосо-

противление из селенида кадмия и кремниевый фотодиод), температура которых регистрируется термисторами. Свет поступает на чувствительные элементы через световоды и гермоокна крышки корпуса датчика. Описанный прибор позволил осуществить измерение лучистых потоков в пяти спектральных интервалах, охватывающих диапазон длин волн 0,50—1,06 мкм, из зенита, из всей верхней полусферы и под углом 23° к надиру. Суммарная погрешность измерений составляет около 30 %.

Рис. 4.20. Вертикальные профили восходящего $F\uparrow$, нисходящего $F\downarrow$ потоков радиации и альбедо $A=F\uparrow/F\downarrow$ по данным АМС «Венера-10» для спектрального интервала 0,50—0,75 мкм.



Вертикальные профили лучистых потоков, полученные по данным СА «Венера-9» и «Венера-10», оказались примерно одинаковыми; они свидетельствуют о существенном различии ослабления света на разных высотах (рис. 4.20). На высотах больше (50 ± 2) км градиент ослабления радиации во всех спектральных интервалах значительно превосходит градиент в нижележащем слое атмосферы, несмотря на возрастание молекулярной плотности с уменьшением высоты. Расчет вертикальных профилей лучистых потоков на основе использования двухпоточкового приближения и модели двухслойной атмосферы (предполагается, что ниже 50 км находится чисто газовая атмосфера), которые обеспечивают наилучшее согласие с данными наблюдений, дал значения оптической плотности, альбедо однократного рассеяния и коэффициента асимметрии индикатрисы рассеяния для верхнего слоя соответственно 20—30; 0,999 и 0,5—0,7.

В случае коротковолновых каналов расхождение в слое 30—50 км превосходит 30 %, что свидетельствует о наличии дополнительного к рэлеевскому механизма ослабления света. Полученные результаты находятся в согласии с выводом, вытекающим из данных нефелометрических измерений, что на высоте около 49 км располагается нижняя граница облаков. В слое 15—50 км возможно

присутствие очень мелкого аэрозоля или существование истинного поглощения, а ниже 15 км доминирует влияние рэлеевского рассеяния. На высотах меньше 50 км прямое солнечное излучение отсутствует. На поверхности Венеры освещенность и лучистый поток в диапазоне 0,5—1,06 мкм равны 14 тыс. лк и 100 Вт/м² соответственно. Альbedo поверхности составляет 2—20 %.

По данным В. С. Авдеевского и др. [3, 4], согласующиеся с данными измерений расчеты вертикального профиля освещенности в слое 0—32 км показали, что ослабление света в этом слое обусловлено главным образом молекулярным рассеянием (коэффициент рассеяния превосходит рэлеевский не более чем на 30 %, альbedo однократного рассеяния больше 0,99, а альbedo поверхности находится в диапазоне 0—0,6). Выше 32 км ослабление может быть обусловлено аэрозольным рассеянием и поглощением. Хотя поверхности Венеры достигает сравнительно небольшая часть внеатмосферного потока солнечной радиации (около 1,8 %), даже этого достаточно для обеспечения значительной освещенности на уровне поверхности (в сравнении с земными условиями) и поддержания высокой температуры нижней части атмосферы. Полученные данные об освещенности не противоречат, таким образом, гипотезе о «парниковом» механизме нагревания атмосферы Венеры.

Лацис и Хансен (см. [140]) выполнили детальное сопоставление рассмотренных данных об освещенности с результатами теоретических расчетов для двух трехслойных моделей атмосферы, осуществив при этом достаточно точный учет многократности рассеяния. Результаты расчетов для модели однородной атмосферы не соответствуют данным наблюдений. Не привело к удовлетворительному согласию с наблюдениями и использование двухслойной модели с границей слоев на уровне 35 км. Это и определило выбор трехслойных моделей, параметры которых указаны в табл. 4.4

Таблица 4.4
Оптические параметры трехслойных моделей атмосферы Венеры

Модель	Слой	$\tilde{\omega}_i$	τ_i	Поглощение, %
1	1	0,997565	18,9	9,98
	2	0,999999	561	0,00
	3	0,999999	517	0,00
	Поверхность	$A=0,995$		0,02
2	1	1,0	8,4	0,0
	2	0,97328	4,4	8,6
	3	—	0,0	0,0
	Поверхность	$A=0,6$		1,4
3	1	0,99787	12,8	5,0
	2	0,99787	10,7	3,1
	3	0,96019	1,0	1,2
	Поверхность	$A=0,8$		0,7

($\tilde{\omega}_i$ и τ_i — альbedo однократного рассеяния и оптическая плотность для отдельных слоев, A — альbedo поверхности Венеры).

Границы слоев зафиксированы на высотах 35 и 48,5 км. Естественно, что отсутствие данных измерений выше 48,5 км вносит неопределенность в выбор параметров для расчетов. Выяснилось, однако, что еще более важное значение имеет отсутствие сведений о характеристиках облаков в нижних слоях атмосферы.

Подобные расчеты и сопоставление их с данными измерений освещенности привели к выводу, что наиболее вероятны следующие диапазоны оптических параметров верхнего слоя: $8 \leq \tau \leq 19$ и $1 \geq \tilde{\omega} \geq 0,9976$. Однозначность выбора этих параметров в наиболее сильной степени затруднена отсутствием сведений об оптических параметрах нижнего слоя. На рис. 4.19 воспроизведены результаты расчетов для двух экстремальных моделей (см. табл. 4.4). В обоих случаях расхождение с данными измерений не выходит за пределы погрешности измерений при суммарном поглощении, равном 10 %.

В случае модели 1 практически вся солнечная радиация поглощается верхним слоем (т.е. выше 48,5 км). Вертикальный профиль освещенности в нижних слоях хорошо описывается в предполо-

жении почти консервативного рассеяния ($\tilde{\omega}=0,999999$) и очень большой аэрозольной оптической плотности ($\tau=1078$). Таким образом, в данном случае вполне удовлетворительным является решение, когда $\tilde{\omega} \rightarrow 1$, а $\tau \rightarrow \infty$.

Для модели 2 поглощение сконцентрировано в среднем слое. Поглощение солнечной радиации подстилающей поверхностью составляет около 1,4 %.

Попытка использования 10-слойной модели показала, что в этом случае можно достичь лучшего согласия с наблюдениями, но возможные вариации оптических параметров облаков остаются примерно такими же, как и для трехслойной модели. Так, например, оптическая плотность всей атмосферы может варьировать в пределах $3 \leq \tau \leq \infty$. При этом следует отметить, что все приведенные выше оценки оптической плотности относятся к случаю изотропного рассеяния. Для учета анизотропии следует ввести поправочный коэффициент 3,3. Следовательно, для всей атмосферы $\tau \geq 10$. Альbedo подстилающей поверхности в точке посадки $A \geq 0,6$, что является неожиданным, так как материалы типа гранитов должны иметь меньшее альbedo. Следует, впрочем, подчеркнуть, что оценка альbedo критически зависит от точности измерений в самой нижней точке.

Таким образом, согласно [140], аэрозольная структура атмосферы Венеры должна быть по крайней мере трехслойной. Результаты измерений освещенности только от верхней полушеры позволяют установить лишь весьма широкие пределы воз-

можной изменчивости оптической плотности и не дают возможности однозначно судить о вертикальном распределении послонного поглощения солнечной радиации.

Как уже отмечалось, анализ данных наземных наблюдений, а также результатов измерений при помощи АМС «Венера-8» и «Маринер-5, -10», показывает, что верхняя часть облачного покрова Венеры, расположенного в диапазоне давлений от нескольких гектопаскалей до нескольких сотен гектопаскалей, является очень диффузной и (по земным стандартам) напоминает дымку или смог. По-видимому, эта дымка охватывает слой атмосферы около 20 км. Отношение концентрации облачных частиц к концентрации газа возрастает с глубиной. Отношение шкал высот газа и частиц составляет около 2 на уровне, которому соответствует оптическая плотность τ , равная единице (примерно 50 гПа), и 1,5 — ниже этого уровня.

По данным наземных поляризационных измерений, концентрация частиц составляет около 30 см^{-3} на уровне 50 гПа. При анализе линий поглощения в близкой инфракрасной области спектра получен диапазон изменения концентрации от 46 см^{-3} вблизи 60 гПа до 515 см^{-3} на уровне 200 гПа.

Согласно данным наземных измерений, Венера поглощает 22,5 % падающего потока солнечной радиации, причем 4 % приходится на ультрафиолетовую область спектра (длины волн меньше 0,4 мкм), 5 % — на видимый диапазон длин волн (0,4—0,7 мкм) и 13,5 % — на инфракрасную область спектра (длины волн более 0,7 мкм). Всего 1 % падающего потока солнечной радиации (5 % поглощенной радиации) ответствен за ультрафиолетовые контрасты яркости облаков. Можно поэтому считать, что ультрафиолетовые контрасты не представляют собой фактора, существенно влияющего на наблюдаемые горизонтальные движения облаков.

Большая часть солнечной радиации поглощается слоем атмосферы на высотах 55—70 км. С этим, вероятно, связано наличие зоны мелкомасштабной турбулентности вблизи 60 км. Максимальное нагревание за счет поглощения солнечной радиации имеет место, по-видимому, при $\tau=1$. Радиационное нагревание существенно зависит от микроструктуры облаков и может значительно изменяться с высотой. По-видимому, в слое $(1 \dots 5) \cdot 10^5 \text{ Па}$ нагревание варьирует от примерно 0,01 до 0,1 К/сут. Ниже 30 км (давление больше 10^6 Па) поглощение солнечной радиации очень мало. На рис. 4.21 изображены вычисленные Лацисом [140] относительные значения пропущенной атмосферой Венеры солнечной радиации, выраженные как $\lg(F_{\downarrow}/F_0)$, где F_0 — внеатмосферный поток солнечной радиации. Приведенные кривые характеризуют значения пропущенной радиации при зенитном угле Солнца $\theta_0=60^\circ$ для уровней, которым соответствуют различные значения оптической плотности τ .

По данным Лациса [140], количество солнечной радиации, поглощенной поверхностью Венеры, варьирует в пределах 0,1—1 %

по отношению к падающему потоку, если только альbedo поверхности не является очень высоким. Малое количество поглощенной поверхностью солнечной радиации означает, что для нагревания поверхности за счет парникового эффекта необходимо, чтобы оптическая плотность атмосферы в инфракрасной области спектра достигала 10^3 — 10^4 .

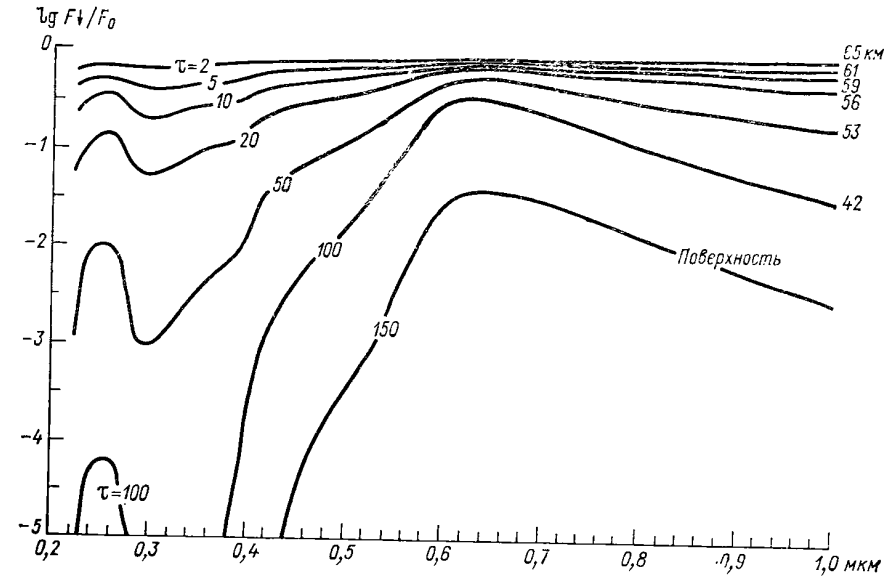


Рис. 4.21. Спектральная зависимость относительных значений солнечной радиации, пропущенной различными слоями венерианской атмосферы.

Интерпретация данных измерений освещенности с АМС «Венера-8» свидетельствует о существовании вертикальной структуры облачного покрова в глубоких слоях атмосферы. Лацис [140] предпринял расчеты вертикальной структуры облачного покрова Венеры, исходя из данных об их оптических характеристиках, представленных на рис. 4.22. Если считать альbedo однократного рассеяния не зависящим от высоты, то результаты вычислений, сделанных с учетом данных измерений освещенности, приводят к выводу о наличии максимальной плотности облаков на высоте 40 км, однородного перемешивания в слое 40—50 км и довольно резкой нижней границы облачного покрова на высоте около 50 км. С гораздо меньшей определенностью можно считать, что наблюдаются относительные максимумы плотности облаков вблизи высот 55 и 10 км.

Диффузная природа верхней части облачного покрова согласуется с предполагаемым фотохимическим происхождением со-

ставляющих его частиц. Возрастание оптической плотности с уменьшением высоты качественно согласуется с оценками оседания частиц радиусом 1 мкм, согласно которым скорость падения частиц возрастает с высотой выше уровня поверхности 50 гПа, но остается постоянной ниже этого уровня. Почти все авторы, анализировавшие данные измерений освещенности, полученные с «Венеры-8», пришли к выводу, что атмосфера является ясной (чисто

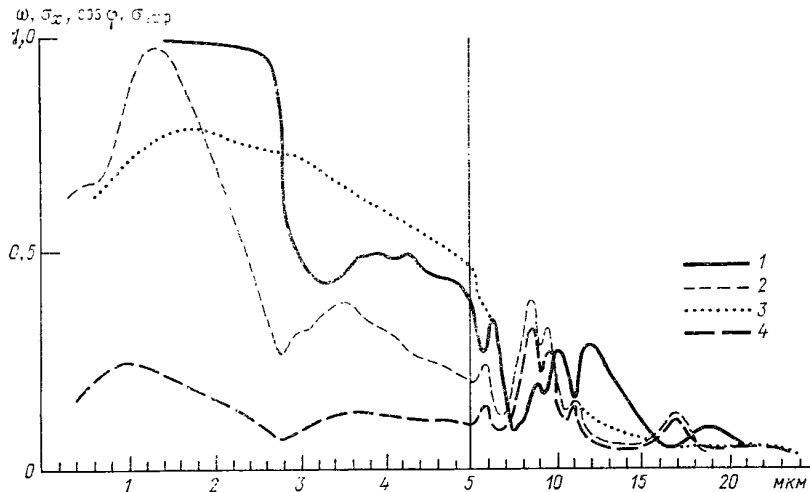


Рис. 4.22. Спектральная зависимость оптических характеристик сернокислотного аэрозоля, рассчитанная для $\bar{r}=1,05$ мкм, концентрации 75 % и данных о комплексном показателе преломления по Пальмеру и Вильямсу. 1 — альбедо однократного рассеяния; 2 — поперечник ослабления σ_x ; 3 — фактор асимметрии индикатрисы рассеяния $\cos \varphi$; 4 — эффективный поперечник ослабления $\sigma_{эфф} = \sigma_x (1 - \cos \varphi)$.

газовой) в нижнем 30-километровом слое. Данные измерений только лишь нисходящего светового потока не позволяют, однако, сделать такой вывод вполне однозначно.

Осуществленный Л. В. Засовой и др. [20] анализ спектров уходящей длинноволновой радиации в диапазоне 250—1650 мкм, зарегистрированных с борта АМС «Венера-15 и -16», позволил выявить обнаруживаемые по специфике спектров особенности структуры облачного покрова. В полосе широт меньше 60° облачный слой более разрежен и отсутствует суточный ход. В поясе $65-78^\circ$ широты наблюдается вытянутая по долготе, но не замкнутая область повышенной концентрации облачных частиц. Верхняя граница облаков в пределах «горячего пятна» ($78-82^\circ$ широты) расположена ниже, чем в других областях планеты.

4.5. Данные АМС «Венера» и «Пионер—Венера»

Новым важным вкладом в исследования Венеры явилось успешное выполнение научных программ АМС «Венера-11» — «Венера-16» и «Пионер—Венера-1, -2» [30—34, 62, 65, 89, 117, 122—125, 127—131, 135]. Эксперименты, успешно проведенные во время спуска станций «Венера-11, -12» в атмосфере планеты, были направлены на решение следующих основных задач [62]: 1) тонкий химический анализ состава атмосферы; 2) изучение природы облаков; 3) исследования теплового баланса атмосферы. Для этого был использован комплекс приборов, включавший: масс-спектрометр, газовый хроматограф, оптический спектрометр и фотометр, нефелометр, рентгеновский флуоресцентный спектрометр, прибор для измерения электрической активности атмосферы. Выполнены также измерения температуры, давления и аэродинамических перегрузок.

Следующие данные характеризуют даты запуска, посадки и другую информацию:

	«Венера-11»	«Венера-12»
Дата запуска	9 сентября 1978 г.	14 сентября 1978 г.
Дата посадки	25 декабря 1978 г.	21 декабря 1978 г.
Широта	13° ю.	7° ю.
Долгота	300°	294°
Зенитное расстояние Солнца	19°	24°
Температура на поверхности	735 К	743 К
Давление на поверхности	$92 \cdot 10^5$ Па	$90 \cdot 10^5$ Па

Пролетные аппараты АМС «Венера-11» и «Венера-12» после отделения спускаемых аппаратов прошли на высоте около 34 000 км над поверхностью планеты.

Данные двух масс-спектрометров, которые были включены на высоте около 24 км и функционировали до посадки, дали совпадающие результаты. Всего передано на Землю около 220 масс-спектров. Их анализ показал, что наряду с основным компонентом атмосферы — CO_2 — в атмосфере Венеры имеется значительное количество азота (около 5 % по объему). Как малая составляющая обнаружен водяной пар и имеются указания на присутствие в сравнимых количествах хлора, серы и, возможно, соединений, содержащих хлор и серу. Соотношение концентраций изотопов углерода C-12 и C-13 соответствует земному в пределах погрешности измерений около 10 %. Масс-спектры выявляют присутствие изотопов аргона-36, -38, -40, неона-20 и криптона-84 при концентрациях (суммарной для аргона), равных соответственно 10^{-2} , 10^{-3}

и $5 \cdot 10^{-4} \%$. Изотопный состав аргона аномален по сравнению с изотопным составом аргона в земных условиях: концентрация «вторичного» (радиогенного) Ar-40 равна суммарной концентрации «первичных» изотопов Ar-36 и Ar-38 . Относительное содержание «первичных» изотопов хорошо соответствует земному значению ($\text{Ar-36}/\text{Ar-38} \approx 5$).

Предварительный анализ девяти проб воздуха при помощи газового хроматографа показал, помимо доминирующего компонента CO_2 , присутствие азота ($\sim 2 \%$), аргона ($\sim 0,4 \cdot 10^{-2} \%$), окиси углерода (несколько тысячных долей процента). Эти данные позволяют сделать вывод о наличии в атмосфере Венеры сернистых соединений (в частности, сернистого газа при объемной концентрации примерно $0,01 \%$).

После раскрытия парашюта на спускаемом аппарате (СА) через каждые 10 с регистрировались спектры дневного неба в диапазоне $0,45\text{—}1,2$ мкм (разрешение $\Delta\lambda/\lambda \approx 30$) и данные фильтровых измерений углового распределения яркости рассеянного излучения на четырех длинах волн: $0,49$; $0,71$; $1,02$ и $1,3$ мкм (разрешение $\Delta\lambda/\lambda \approx 4$). Угол зрения в обоих случаях составлял около 15° . Исследование спектров дневного неба Венеры выполнено впервые.

Анализ примерно 500 спектров и данных об угловом распределении характеризует изменение спектрального распределения энергии в процессе спуска СА, обусловленное рассеянием на частицах облаков (аэрозоля), молекулярным рассеянием и молекулярным поглощением в полосах углекислого газа и водяного пара. В спектрах, зарегистрированных с поверхности Венеры и вблизи нее, проявляются глубокие полосы углекислого газа ($0,78$; $0,87$; $1,05$ мкм) и водяного пара ($0,82$; $0,95$; $1,14$ мкм). Обнаружена (и пока не отождествлена) широкая полоса поглощения в интервале $0,46\text{—}0,55$ мкм. В диапазоне высот от уровня раскрытия парашюта до поверхности интенсивность рассеянной радиации в интервале длин волн $0,60\text{—}0,85$ мкм уменьшается примерно в 10 раз, а в пределах слоя облачности — всего в два раза. Объемный коэффициент рассеяния максимален вблизи нижней границы облаков, расположенной на высоте около $48\text{—}50$ км. Обработка рассматриваемых данных имела целью получить сведения о химическом составе, структуре облачного покрова и тепловом балансе венерианской атмосферы.

Данные нефелометра обратного рассеяния (канал $0,92$ мкм при полуширине $0,015$ мкм) и фотометра, измеряющего излучение, рассеянное исследуемым объектом атмосферы в заднюю полусферу, подтверждают аналогичные данные АМС «Венера-9, -10» о расположении нижней границы облаков на высоте около $48\text{—}49$ км. Наблюдаемый в слое $48\text{—}51$ км максимальный коэффициент рассеяния обусловлен либо повышенной оптической плотностью, либо значительным вкладом в рассеяние крупных частиц с высоким показателем преломления. Под облаком атмосфера, как правило, достаточно прозрачна, но наблюдаются отдельные слои, где рассеяние усиливается под влиянием аэрозоля. Помимо обнаружен-

ного ранее аэрозольного слоя на высоте $14\text{—}17$ км, замечен аналогичный слой в интервале высот $5\text{—}10$ км.

Если аэрозоль, расположенный вблизи нижней границы облаков и под облаками, представляет собой крупные частицы с эффективным радиусом $r \geq 2,5$ мкм, показателем преломления $n \approx 1,8 \dots 2,0$ и малой концентрацией частиц $N = 1 \dots 2 \text{ см}^{-3}$, то можно предположить, что этот аэрозоль состоит из частиц серы. Не исключена, однако, и другая интерпретация полученных данных наблюдений.

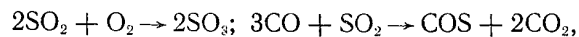
На СА «Венера-12» впервые была предпринята попытка определения элементного состава аэрозоля венерианских облаков при помощи рентгенофлуоресцентного анализатора. При предварительном анализе данных для участка парашютного спуска (высота $60\text{—}45$ км) обнаружено присутствие хлора и возможное наличие серы. Исключена возможность существования ртути при концентрации, превышающей $1 \cdot 10^{-9} \text{ г/см}^3$.

Эксперимент по изучению электрической активности атмосферы Венеры, осуществленный при помощи длинноволнового спектроанализатора диапазона $80\text{—}100$ кГц с внешней антенной (имелся также акустический канал с внешним датчиком), привел к обнаружению импульсных полей, которые можно отождествлять как связанные с грозовыми процессами в атмосфере Венеры [45, 134]. В средней части траектории спуска СА «Венера-11» в течение 13 мин зарегистрирована большая группа импульсов (частотой до 25 импульсов в секунду) с напряженностью электрического поля до 700 , 130 , 40 и 6 мкВ/м на частотах соответственно 10 , 18 , 36 и 80 кГц. Частота импульсов немного превышает наблюдаемую при земных грозах. Ниже 2 км и на поверхности планеты напряженность поля резко падает. Возможно, нижний слой атмосферы Венеры оказывает сильное экранирующее воздействие в диапазоне частот $8\text{—}100$ кГц.

Опираясь на новые данные АМС «Венера», В. Л. Барсуков и др. [10] предложили новую геохимическую модель тропосферы Венеры, которая согласуется со всеми имеющимися данными измерений химического состава тропосферы. В основу модели положен учет термодинамики и кинетики газовой фазы, термодинамики равновесия между тропосферой и твердой оболочкой, а также специфика общей циркуляции атмосферы.

Фотохимические процессы в верхней атмосфере Венеры (высота более 67 км) приводят к образованию O_2 и SO_2 , тогда как вулканические извержения могут продуцировать восстановительные компоненты (CO , COS , H_2S). Если предположить, что восходящие ветви конвективных ячеек содержат газы вулканического происхождения, а нисходящие — продукты фотохимических процессов, то можно объяснить как данные АМС «Венера-11, -12» (восстановительный характер тропосферы), так и данные АМС «Пионер-Венера-1, -2» (окислительный характер тропосферы).

Рассмотрение возможности равновесного состава тропосферы по отношению к содержащим серу компонентам, основанное на учете реакций:



показало, что данные АМС «Пионер—Венера» противоречат этой возможности, тогда как данные «Венеры-11, -12» допускают равновесность состава вблизи поверхности планеты. Таким образом, не только слой облачности, но и тропосферу под облаками (по крайней мере до высоты 24 км, согласно данным АМС «Пионер—Венера», или 1 км, согласно данным АМС «Венера-11, -12») следует рассматривать как зону, где условия химического равновесия не достигаются.

Возможность химического равновесия в приповерхностном слое атмосферы определяется тремя факторами: 1) возрастанием скорости реакции у границы раздела фаз, обусловленным каталитическим воздействием горных пород Венеры; 2) особенностями топографии, характеризующейся контрастами рельефа большей пространственной частоты и меньшей амплитуды, чем на других планетах земной группы; 3) скоростью ветра 1—3 м/с в слое 0—10 км. Два последних фактора определяют возможность существования мелкомасштабных конвективных ячеек вблизи поверхности с медленными вертикальными движениями.

С учетом химического состава тропосферы по данным АМС «Пионер—Венера» и «Венера-11» (тропосфера рассматривается как восстановительная и сухая) и предположения об аналогичности состава горных пород на Земле и Марсе в работе [10] выполнены термодинамические расчеты равновесия в системе базальт—тропосфера по отношению к H_2O , CO_2 , CO , SO_2 , HCl и HF . Модель равновесия однородной газовой системы H—C—O—N—S—Cl—F , опирающаяся на принцип минимума суммарной свободной энергии, допускает оценку вертикальных профилей концентрации различных компонентов в тропосфере.

На основе расчета содержания H_2O , CO_2 , CO , HCl , SO_2 и других летучих компонентов В. Л. Барсуков и др. [10] построили предварительную модель минералогического состава горных пород, включающую такие содержащие летучие компоненты минералы, как пирит, ангидрит, маршалит, флуорит и селлаит. Расчеты показали, что взаимодействие между приповерхностным слоем тропосферы и базальтами твердой оболочки может приводить к затратам кислорода и серы на образование гематита, ангидрита и других сульфатов. Связанные в горных породах сера, хлор, фтор могут выделяться в атмосферу.

Если считать, что химическое выветривание (путем гидратации, окисления и других процессов) не тормозится кинетическими и механическими факторами, то можно предположить в качестве экстраемального случая образование некоторых метаморфогенных горных пород, содержащих значительное количество воды, серы и хлора. Предварительный анализ вероятной природы и состава

облаков, определяемого конкурирующим взаимодействием фотохимических и термохимических реакций в зоне слоя облачности, показал, что главными компонентами облаков должны быть капли жидкой серы, а также соляной и серной кислот.

На АМС «Пионер—Венера-1», выведенной 4 декабря 1978 г. на орбиту искусственного спутника Венеры (ИСВ), установлена аппаратура дистанционного зондирования средней атмосферы планеты (слой 60—140 км) с целью определения вертикальных профилей температуры и влажности, структуры облачного покрова, параметров динамики средней атмосферы и радиационного баланса при помощи методики, примененной ранее для исследований земной тропосферы, стратосферы и мезосферы [197].

Аппаратура представляет собой комплекс, состоящий из спектрометра с дифракционной решеткой (разрешение около 20 см^{-1}), который обеспечивает выделение четырех каналов в 15-мкм полосе CO_2 (соответствующие весовые функции охватывают диапазон высот 65—95 км) и канал в микроокне прозрачности около 11,5 мкм, радиометра с модуляцией давлением (интервал высот 95—140 км), а также радиометров с фильтрами, предназначенных для измерений альбедо (0,4—5,0 мкм), содержания водяного пара (35—55 мкм) и структуры облачного покрова (2,0 мкм). Все каналы имеют бортовую систему калибровки по космосу и различным стандартным источникам. Поле зрения равно $1,25^\circ$ (за исключением 5° для радиометра с модуляцией давлением), что обеспечивает пространственное разрешение около 4 км при минимальной высоте ИСВ, составляющей в периферии 150 км. Сканирование за счет вращения ИСВ позволяет по данным, накопленным за 1 час, строить изображения для различных каналов. Весовые функции для каналов в 15-мкм полосе CO_2 и канала 35—55 мкм получены путем лабораторных измерений при помощи многоходовой кюветы длиной 8 м при давлении, равном 10^5 Па .

Первые данные за 5 декабря 1978 г. привели к неожиданному результату: слой 65—85 км оказался более теплым над северным полюсом, чем над экватором, причем контраст температур достигает 10—15 К вблизи верхней границы облачного покрова, уменьшаясь с высотой. Вблизи уровня 85 км знак контраста изменяется и на высоте 100 км атмосфера над полюсом примерно на 5 К холоднее, чем над экватором. Почти на всех высотах амплитуда суточного хода температуры (разность температур на дневной и ночной сторонах планеты) мала по сравнению с контрастом экватор—полюс. Ситуация изменяется на противоположную на больших высотах: средний контраст день—ночь на высоте 100 км равен 15—20 К, причем на экваторе атмосфера теплее днем, чем ночью. Контраст температуры уменьшается с широтой, становясь ничтожно малым в зоне широт больше 60° .

Выполненный Тэйлором и др. [197] анализ полей температуры на различных изобарических поверхностях выявил наличие квази-

случайной структуры, которая по крайней мере частично обусловлена тепловыми волнами. Рассмотрение временной изменчивости на различных высотах позволило обнаружить волны с амплитудой 2—4 К и периодом 5—6 сут, распространяющиеся вверх с изменением фазы в зависимости от высоты. Найден компонент изменчивости температуры, связанный с положением Солнца. Пространственная структура поля температуры выше 100 км и в слое 60—90 км характеризуется преобладанием возмущений с волновыми числами 1 и 2 соответственно.

Расчеты поля ветра по данным о зонально осредненном поле температуры привели к выводу о наличии медленного потока от экватора к полюсу вблизи верхней границы облаков при нисходящих движениях в зоне полюса. В надоблачной атмосфере наблюдается дивергенция в поле ветра вблизи полюса с восходящими движениями и возвратом к экватору выше 90 км. Скорость меридионального потока на этих высотах может достигать 60 м/с, тогда как зональный компонент ветра близок к нулю (у верхней границы облаков он достигает 100 м/с).

Глобальная структура облачного покрова Венеры (по данным анализа ИК изображений на длине волны 11,5 мкм) характеризуется возрастанием оптической плотности облаков с широтой: северный полюс окружен оптически плотным «воротничком» холодных облаков с верхней границей, расположенной на 8—10 км выше, чем в полосе экватора. Возможно, участок максимальной плотности «воротничка» связан с положением Солнца. Над самым полюсом высота верхней границы облаков сильно уменьшается (на 15 км и более по сравнению с зоной «воротничка»), а яркостная температура максимальна и достигает в некоторых местах 260 К. По обе стороны от полюса расположены два ярких (в ИК области спектра) «глаза», которые вращаются со средним периодом около 2,7 сут.

При интерпретации данных измерений отраженной солнечной радиации выявлено наличие двух основных мод микроструктуры облаков: фракции частиц размером около 1 мкм в полосе широт 20° ю. ш. — 75° с. ш. и более крупнодисперсной фракции в районе полюса. На всех широтах существует также мелкодисперсная фракция, содержащая частицы радиусом около 0,15 мкм. Яркостная температура для интервала 35—55 мкм минимальна в высоких широтах, что отражает возрастание непрозрачности атмосферы, которая, по-видимому, обусловлена неоднородностью распределения водяного пара.

При наземных наблюдениях теплового излучения Венеры в окне прозрачности атмосферы 8—12 мкм всегда обнаруживалась высокая однородность яркостной температуры (ЯТ), составлявшей около 240 К, что дало основание сделать вывод об исключительной однородности облачного покрова Венеры. Первоначальные данные ИСВ «Пионер—Венера», относившиеся к экваториальным и умеренным широтам, подтвердили этот вывод. Хотя, как и ранее по данным наземных наблюдений, обнаруживалась

изменчивость в форме суточного, годового хода и случайного компонента, амплитуда изменчивости не превосходила 10 К. Однако Тейлор и др. [197] обнаружили, что поле ЯТ сильно изменяется в околополярной зоне. Даже по наземным наблюдениям выявлялись иногда вблизи полюса «холодные» полосы и «горячие» пятна.

Установленный на ИСВ «Пионер—Венера-1» многоканальный радиометр позволил впервые осуществить измерения излучения Венеры в окне прозрачности атмосферы (канал 11,5 мкм) при почти полярной орбите спутника (угол наклона орбиты равен 105°). При наблюдениях в режиме низкой пространственной разрешающей способности обнаружен волнообразный «воротничок» высоких холодных облаков, окружающих северный полюс, при повышении ЯТ в направлении к полюсу. Максимальная температура планеты зафиксирована в непосредственной близости от полюса, причем не только вблизи верхней границы облаков, но и в вышележащей атмосфере.

В работе [197] рассмотрены первые результаты измерений ЯТ в полярной зоне при высоком пространственном разрешении, полученные 15 декабря 1978 г. Обнаружен «всплеск» ЯТ в точке 80° с. ш., 359° д. (местное время около 9 ч) при температуре 260 К, превосходящей когда-либо наблюдавшуюся на Венере. Подобный всплеск можно объяснить лишь разрывом в облачном покрове или понижением верхней границы облаков, что, вероятно, обусловлено влиянием сильных нисходящих движений в атмосфере.

Если наблюдаемый в рассматриваемом случае контраст температуры около 45 К вызван изменением высоты облаков, то разность высот должна составлять примерно 15 км, что маловероятно. Расчеты показали, что в случае безоблачной атмосферы измеряемая ЯТ должна достигать примерно 290 К. Поскольку измерения не охватывают полностью зону горячего пятна, возможно, что последующие измерения приведут к значениям ЯТ, превышающим 260 К.

Упомянутый вывод о влиянии нисходящих движений согласуется с результатами анализа последовательности УФ изображений, который позволил обнаружить вихревую циркуляцию в стратосфере вблизи полюсов Венеры с меридиональным подтоком воздуха из низких широт, формирующим полушарную циркуляцию типа ячейки Гадлея. В связи с этим естественно предположить, что однородность венерианского покрова обусловлена наличием циркуляции с медленными восходящими движениями на большей части планеты, балансируемыми относительно быстрыми нисходящими потоками в пределах полярных вихрей. Однако такая схема оставляет нерешенными ряд вопросов: 1) неясно, почему глаз вихря не совпадает с полюсом вращения; 2) остается необъясненным плотный полярный облачный «воротничок»; 3) меридиональный перенос должен совершаться в направлении возрастания температуры

от экватора к полюсу, что противоречит механизму классической циркуляции Гадлея, определяемой меридиональным градиентом притока солнечной радиации. По-видимому, динамика стратосферы Венеры определяется более сложным механизмом.

С целью анализа структуры облаков в связи с особенностями динамики атмосферы Тэйлор и др. [196] рассмотрели результаты обработки части информации, содержащей около 800 000 восстановленных вертикальных профилей температуры и сведения о непрозрачности облаков, полученные по данным измерений при помощи установленного на ИСВ «Пионер—Венера» многоканального инфракрасного радиометра (МИКР), который функционировал в двух режимах: 1) спектральных измерений уходящего излучения в надири; 2) сканирования лимба. Рассматриваемая информация характеризует трехмерную структуру полей температуры и облачности, а также особенности динамики атмосферы на высотах 60—130 км. Получен вертикальный градиент температуры в слое 65—85 км, равный 3,5 К/км, что хорошо согласуется со средним значением (3,9 К/км), найденным по радиорефракционным данным АМС «Венера-9 и -10». Слой 95—105 км оказался почти изотермическим. Выше 105 км на ночной стороне зарегистрировано убывание яркостной температуры (определяемой в предположении, что излучательная способность равна единице) до значений около 120 К (в этом случае необходимо, однако, иметь в виду возможность нарушения локального термодинамического равновесия и, следовательно, трудность интерпретации температуры как кинетической).

При обработке данных измерений для лимба вблизи перигея орбиты ИСВ обнаружен перегиб вертикального профиля температуры около уровня 72 км и наличие полупрозрачных (в ИК диапазоне) облаков, достигающих высоты около 80 км. Последнее согласуется с оптической плотностью на длине волны 11,5 мкм по данным измерений для надири, равной единице на высоте 68 км, если принять шкалу высот около 2 км. Гораздо более сильное потемнение к краю диска по данным для 45-мкм канала на дневной стороне, чем на ночной, свидетельствует о существовании значительного суточного хода непрозрачности в далекой ИК области спектра в верхней части слоя облачности и над ним. Это может быть связано с различиями влажности атмосферы.

При анализе карт температуры для изобарических уровней, как правило, обнаруживается усиление контрастов с высотой. Так, например, построенная по данным для 4-го и 33-го витков карта, характеризующая поле температуры 20-км слоя атмосферы на высоте 100 км, показывает, что дневная сторона на 15—20 К теплее ночной. Суточный ход температуры заметен и на меньших высотах. Значения зонально осредненных контрастов температуры день—ночь резко возрастают выше 90 км. В зоне широт больше 60° с. ш. суточный ход выражен слабо. В нижней части надоблачной атмосферы обнаружено неожиданное повышение температуры от экватора к полюсу, которое отсутствует на высоте 100 км.

Карты полей температуры, построенные по данным для других витков, позволяют выявить мелкомасштабный суточный ход с амплитудой 5—10 К, который может быть отчасти обусловлен планетарными волнами. Расчет поля ветра по зонально осредненному полю температуры показал, что преобладающий в рассматриваемой толще атмосферы положительный градиент температуры экватор—полюс обуславливает средний зональный ветер, скорость которого быстро уменьшается от примерно 100 м/с на уровне верхней границы облаков (четырёхсуточная циркуляция) до почти нулевой на уровне 80 км.

Анализ УФ изображений Венеры, полученных при помощи ИСВ «Пионер—Венера» почти за три месяца начиная с января 1979 г., когда условия освещенности стали достаточно благоприятными, позволил не только проследить за известной четырех-пятисуточной квазипериодичностью, но и исследовать долговременные вариации глобальной морфологии облачного покрова. Травис и др. [211] рассмотрели результаты интерпретации семи изображений планеты за 18 января, 10, 11, 14, 15, 16 февраля и 7 марта 1979 г. Крупномасштабные особенности поля облачности характеризуются сильной изменчивостью. По серии пяти февральских изображений выявляется повторяемость Y-образной неоднородности облачного покрова, которая обладает примерно четырехсуточной квазипериодичностью, но (как показывают другие изображения) иногда отсутствует на протяжении нескольких недель, хотя некоторые ее компоненты сохраняются. Y-образная неоднородность формируется как совокупность следующих структур: 1) темной экваториальной полосы, которая расширяется по направлению потока и соединяется с двумя темными полосами, протянувшимися из низких в умеренные широты по направлению потока; 2) наклонной яркой полосы в районе южного полюса и связанных с нею ярких «струй», которые почти параллельны темным полосам; 3) дугообразных структур, обычно обнаруживаемых вблизи вершины угла Y-образной неоднородности. Дугообразные структуры наблюдаются часто, но на изображениях с АМС «Пионер—Венера» эти структуры обнаруживаются значительно дальше по направлению движения от подсолнечной точки, чем это было в случае изображений с «Маринера-10».

Рассмотрение всей трехмесячной серии изображений выявляет регулярное присутствие мелкомасштабных ячеистых структур в низких широтах, которые иногда достигают широт около 50°. Интерпретация облачных структур все еще осложняется неопределенностью природы УФ поглощения и рассеивающего компонента, ответственных за формирование контрастов яркости. По крайней мере три компонента облаков определяют обнаруживаемое на изображениях поле яркости: 1) расположенная на больших высотах оптически тонкая дымка субмикронного аэрозоля, часто наблюдаемая вблизи утреннего терминатора и в полярных

районах; 2) смог из капель серной кислоты радиусом 1 мкм, составляющих главную часть видимого облачного покрова; 3) УФ поглотитель, находящийся в облаках или под видимой частью сернокислотной облачности. Осуществляется анализ данных поляриметрических измерений и сведений о поле ветра, полученных по движению элемента облачного покрова, с целью изучения природы и пространственного распределения упомянутых трех компонентов облачного покрова.

С целью дальнейших исследований природы и вертикального распределения компонента облачного покрова, ответственного за поглощение УФ радиации, Поллак и др. [156] выполнили анализ данных различных фотометрических измерений с ИСВ и СА «Пионер—Венера», а также соответствующих наземных наблюдений. Фотометрические измерения на СА позволили выявить природу УФ поглотителя на высотах около 62 км и ниже (оптическая плотность облаков $\tau \geq 4$), а наблюдения с ИСВ и наземные наблюдения определили ограничения, налагаемые на природу и концентрацию поглотителя на больших высотах. В частности, значительный рост контрастов яркости с уменьшением фазового угла исключает возможность того, что поглотитель ультрафиолетовой радиации располагается над верхней границей сернокислотных облаков.

Из анализа кривых потемнения к краю диска, построенных по данным УФ спектрометра, вытекает, что концентрация поглотителя должна значительно увеличиваться с глубиной в пределах верхнего слоя облаков, имеющего оптическую плотность, равную нескольким единицам. Совокупность рассматриваемых данных свидетельствует о том, что поглощение УФ солнечной радиации происходит во всей основной толще облачного покрова, но слабо проявляется над облаками и в пределах верхней части облаков, имеющей оптическую плотность около 1—2.

С целью поиска адекватной модели УФ поглотителя в работе [156] осуществлены численное моделирование условий наблюдений, а также расчеты спектрального хода сферического альбеда при варьировании некоторых параметров, определяющих перенос излучения. Рассмотрены пять возможных компонентов, ответственных за поглощение: частицы из серы, вещества метеоритов и железа, двуокись азота и сернистый газ. Для сравнения сделаны также расчеты для чисто рассеивающего сернокислотного облака.

Сравнение результатов вычислений с данными измерений определенно исключает как неадекватные компоненты вещество метеоритов, железо и двуокись азота. Хотя модель мелких (около 1 мкм) частиц серы воспроизводит некоторые данные наблюдений, имеются серьезные противоречия. В частности, происходит слишком быстрый спад сферического альбеда при уменьшении длины волны от 0,4 до 0,32 мкм, а также возникает слишком слабое поглощение радиации длин волн больше 0,4 мкм в слое облачного покрова от его верхней границы до нижней.

Нереальной оказывается и модель больших (около 10 мкм) частиц серы, особенно для описания вертикального профиля эффективного потока радиации в видимой области спектра, яркости неба в УФ лучах и отношения яркости в УФ и видимой областях спектра. В этом случае имеют место некоторые противоречия с данными наблюдений: завышено альбеда в интервале 0,35—0,40 мкм, занижено поглощение радиации длин волн больше 0,4 мкм верхней частью облаков. Возможно, эти расхождения обусловлены неточностью некоторых характеристик сернистого газа, особенно коэффициентов поглощения на длинах волн больше 0,32 мкм.

Если SO_2 является УФ поглотителем, то наличие контрастов яркости должно быть связано с вариациями отношения смеси сернистого газа в верхней части облаков, где оно быстро убывает в результате фотодиссоциации. Возможно, темные участки облачного покрова являются районами крупномасштабных вертикальных движений или усиления турбулентности, что вызывает возрастание содержания двуокиси серы в верхней части облаков.

Анализ данных спектрометров, установленных на АМС «Венера-9 и -10», привел к обнаружению района гроз на площади около $5 \cdot 10^4 \text{ км}^2$ при повторности молниевых разрядов $2 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-2} \times \text{с}^{-1}$, эквивалентной 100 молниям в секунду, причем грозы имели место в слое облачности. В. А. Краснопольский [134] рассмотрел уточненные оценки энергетических характеристик молний на Венере по данным оптических наблюдений при помощи АМС «Венера-9 и -10», которые привели к значениям суммарной энергии вспышки $8 \cdot 10^8 \text{ Дж}$ и среднего выделения энергии в молниях 10^{-7} Дж/см^2 , что в 25 раз превосходит соответствующие параметры земных молний. Молнии наблюдались в слое облачности Венеры, а осредненная по планете повторность разрядов в приповерхностном слое атмосферы составляла меньше 5 с^{-1} , если энергия разряда превосходила $4 \cdot 10^5 \text{ Дж}$, и была меньше 15 с^{-1} при энергии $(1 \dots 4) \cdot 10^5 \text{ Дж}$.

Средний поток молекул окиси азота, образующейся под воздействием молниевых разрядов, равен $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, поток атомов азота — $7 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, поток атомов азота к ночной стороне — $3,2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Почти все молекулы азота в верхней атмосфере исчезают при взаимодействии с атомами азота, а результирующий поток NO на высотах 80—90 км равен $5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что является ничтожно малым значением по сравнению с потоком NO, образующимся при разрядах молний. Если принять, что единственным стоком NO является преддиссоциация в слое 80—90 км, то отношение смеси NO на высоте 80 км составляет $2 \cdot 10^{-8}$, а при наличии стока на поверхности отношение смеси в слое облачности равно $0,8 \cdot 10^{-9}$. Избыточное отношение смеси NO около $4 \cdot 10^{-8}$ может существовать в районах гроз.

Рассэл и Брэйс [175] рассмотрели данные наблюдений с ИСВ «Пионер—Венера» за период до 31 января 1979 г., свидетельствующие о наличии молниевых разрядов на Венере. После того как перицентр ИСВ переместился на ночную сторону планеты (конец декабря 1978 г.), были получены первые данные о молниях при помощи датчика электрического поля. В работе [175] обсуждены результаты измерений, выполненных при помощи датчика электрического поля (регистрировалась амплитуда сигнала в четырех полосах, центрированных при 0,10; 0,73; 5,4 и 30,0 кГц), магнетометра и зонда Ленгмюра.

При регистрации электрического и магнитного полей обнаружены импульсы, которые можно рассматривать как проявления молниевых разрядов, поскольку: 1) регистрируемые сигналы интенсивны и характеризуются ярко выраженным импульсным характером; 2) сигналы зафиксированы вблизи перицентра при локализации ИСВ вблизи нижней границы ионосферы; 3) спектральные характеристики сигналов, как правило, соответствуют моде вистлеров, распространяющихся через ионосферу; 4) сигналы часто наблюдались в такие периоды времени, когда измерения обнаруживали низкие и изменчивые значения электронной концентрации. Возможна, однако, и другая интерпретация данных волновых измерений (например, импульсы могут быть проявлением электростатических ионных акустических или электростатических ионных циклотронных волн).

Зарегистрированные со спускаемых аппаратов АМС «Венера-11 и -12» и орбитального аппарата «Пионер—Венера» спорадические радиоэмиссии были интерпретированы как проявления молниевой активности в венерианской атмосфере. В связи с этим Крафт и Прайс [92] выполнили анализ условий распространения в атмосфере Венеры случайной последовательности атмосфериков по данным АМС «Венера-11», который привел к выводу, что они должны быть обусловлены молниевыми разрядами на высотах меньше 33 км. Этот вывод подтверждает предположение, что молнии возникали в районах двух крупнейших вулканов. Следует сказать, что лежащий в основе рассмотренной интерпретации данных «Венеры-11» факт усиления атмосфериков на высотах меньше 33 км мог быть случайным и, кроме того, не учтено влияние ионосферы, поэтому необходимы дальнейшие исследования.

Установленная на искусственном спутнике «Пионер—Венера» аппаратура для измерений характеристик плазмы часто регистрировала сильные импульсы низкочастотных сигналов, когда спутник пересекал ночную ионосферу вблизи перицентра. Подобные всплески шумов возникали в случаях, когда имело место устойчивое и сильное локальное магнитное поле, направленное вниз. Регистрируемые сигналы обладали всеми типичными характеристиками молниевых вистлеров. В связи с этим в работе [176] была предпринята попытка идентифицировать источники молний между слоями облачности и поверхностью планеты путем прослеживания линий визирования вдоль В-поля от спутника к поверхности. Ана-

лиз обширного массива данных наблюдений на 1185-м витке показал, что имеют место кластеризация источников молний в областях Бета и Феба, а также второй максимум в области Альфа на восточном краю Земли Афродиты. Эти результаты свидетельствуют о наличии ряда областей преимущественной локализации источников молний вблизи или у поверхности планеты.

В связи с неудавшимися попытками обнаружить световые всплески молний на Венере при помощи датчика звезд Боруцки и др. [83] выполнили лабораторное моделирование электрических разрядов в условиях, имитирующих атмосферу Венеры, с целью изучения спектра разрядов в видимом и близком ИК диапазонах длин волн (530—820 нм). Предполагается, что молниевая активность на Венере ограничена облачностью, а разряды возникают между облаками при атмосферном давлении около 10^5 Па. Поэтому атмосферу Венеры имитировала газовая смесь (96 % CO_2 , 4 % N_2 , $185 \text{ млн}^{-1} \text{ SO}_2$, $100 \text{ млн}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ и $100 \text{ млн}^{-1} \text{ Ag}$) при давлении 10^5 Па, находящаяся в стальной камере объемом 8 л. При анализе спектра разрядов обнаружены линии O, C и H, но не выявлено излучения N или молекул. Как данные измерений, так и результаты расчетов показали, что возникает интенсивное свечение в интервале длин волн 600—900 нм. Поэтому то, что при помощи датчика звезд не удалось обнаружить всплески молний на Венере, следует объяснить либо малой повторностью всплесков, либо их слабой интенсивностью.

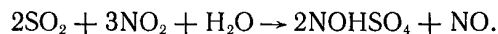
На основе использования метода Монте-Карло Вильямс и Томасон [219] сделали уточненные вычисления пропускания атмосферой Венеры света молниевых всплесков в спектральном интервале 0,68—0,70 мкм, которые дали значительно более высокие значения пропускания (и, следовательно, более существенную вероятность обнаружения молний), чем найденные ранее. Предполагается, что расположенный горизонтально линейный источник всплесков длиной 10 км находится на уровне венерианской поверхности (ее альbedo равно 0,15) в нижнем, среднем или верхнем слоях облачного покрова. Получены следующие значения доли фотонов, уходящих в космос, в зависимости от высоты расположения источников молний: 0,64 (верхний слой облачности); 0,4 (средний слой); 0,36 (нижний слой); 0,21 (поверхность). То, что молнии на Венере не были до сих пор обнаружены, свидетельствует о невозможности ранее предложенного объяснения пепельного света на Венере как обусловленного молниевыми всплесками.

Полученные Уотсоном и др. [215] оценки показали, что при молниевых разрядах поток молекул окиси азота должен составлять около $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, если мощность этих разрядов эквивалентна мощности земных разрядов. Однако анализ данных «Венеры-11» привел к выводу, что мощность разрядов достигает $2 \cdot 10^{10}$ Вт, превышая соответствующее значение для Земли при-

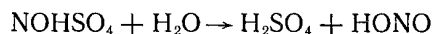
мерно в 20 раз, и, следовательно, поток молекул NO на Венере имеет порядок $10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

На Земле основным механизмом стока нечетного азота является его удаление за счет вымывания осадками, но в условиях Венеры подобный механизм отсутствует и поэтому продолжительность жизни нечетного азота должна быть значительно большей (достижение отношения смеси нечетного азота порядка 10^{-6} требует продолжительности жизни несколько тысяч лет). Образующаяся таким образом окись азота может играть существенную роль в химии венерианских облаков.

В работе [215] сделаны расчеты скорости образования двуокиси азота в предельном случае высокой концентрации окиси азота. Предполагается, что при таких условиях NO_2 может катализировать образование сернокислотного аэрозоля из сернистого газа и водяного пара, а также приводить к образованию таких азотно-серных соединений, как нитрозилсерная кислота NOHSO_4 по реакции:



Возможно, зарегистрированные СА «Пионер—Венера» крупные частицы состоят в значительной мере из нитрозилсерной кислоты. Если это предположение справедливо, то отношение смеси нечетного азота в атмосфере Венеры должно составлять не менее нескольких долей на миллион. При падении капель нитрозилсерной кислоты в нижние, более влажные слои атмосферы должен происходить гидролиз по реакции:



с последующим фотолизом HONO и высвобождением NO.

Большой интерес представляют данные о генерации молний на различных планетах [142]. Недавние наблюдения с АМС «Вояджер» выявили наличие на темной стороне Юпитера интенсивных световых вспышек, обусловленных молниевыми разрядами, существование которых было подтверждено и данными наблюдений вистлеров. Расчеты показали, что молниевые вспышки на Юпитере ярче, чем на Земле, но частота их возникновения примерно такая же. Хотя при анализе результатов наблюдений в оптическом диапазоне не обнаружено молний на Венере, основания для предположения об их наличии дали сведения о «радиовспышках», зарегистрированных по данным АМС «Венера» и «Пионер—Венера». Радионаблюдения позволяют предположить возможность существования электрических разрядов в зоне колец Сатурна. В табл. 4.5 приведены характеристики молниевых разрядов на Юпитере, Венере и Земле.

Наблюдения молний на различных планетах представляют интерес по ряду причин. Молнии являются источником информации о динамике и структуре облачного покрова, фактором изменений химического состава атмосфер и формирования газовых компонентов, благоприятствующих возникновению жизни, индикатором

Таблица 4.5

Сравнение характеристик молний на Юпитере, Венере и Земле

Характеристика	Юпитер	Венера	Земля
Диссипация энергии, Вт/м ²	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$< 0,4$ (на темной стороне)	0,08
Частота вспышек, км ⁻² · год ⁻¹	4—40	$> 0,03$	2—7
Общая энергия вспышки, Дж	10^{12}	10^{10}	$4 \cdot 10^8$
Локализация молний	Западные струйные течения	?	Районы фронтальной или локальной конвективной активности
Местоположение молний	Водные (?) облака	Облака	Кучево-дождевые облака

формирования электрического поля в атмосфере и др. С учетом значительного прогресса, достигнутого за последние годы в изучении механизмов быстрого усиления электрического поля в результате зарядки частиц и разделения частиц с разными зарядами в земных облаках, а также вывода о том, что главной причиной электризации земных облаков являются взаимодействия между частицами облаков и осадками (относительно конкретных механизмов усиления электрического поля все еще существуют разные мнения), Левин и др. [142] предприняли анализ возможностей генерации молний на разных планетах. Этот анализ опирается на результаты детального обсуждения свойств земных облаков, в которых возникают молнии, характеристик самих молний и электрического поля хорошей погоды, а также сделанные на основе подобного рассмотрения выводы об условиях генерации молний и возможных механизмах электризации земных облаков. В связи с этим проанализированы и механизмы электрических разрядов и вистлеров.

Данные наблюдений структуры облачного покрова и вистлеров на Юпитере (как и результаты наблюдений молниевых вспышек в оптическом диапазоне) показывают, что процессы разделения зарядов и генерации молниевых разрядов сходны с существующими на Земле. С учетом подобной аналогии можно предположить, что молнии на Венере должны возникать в тех участках слоя облачности, которые расположены в районах конвекции (такого рода условия имеют место прежде всего в районе, находящемся по направлению ветра от подсолнечной точки). Если на Венере происходят извержения вулканов, то образование молний возможно и в шлейфах продуктов вулканических извержений, хотя учет одной лишь этой возможности не позволяет объяснить наблюдаемую частоту молниевых разрядов.

Юпитерианские молнии генерируются, скорее всего, в нижней части облачного покрова, состоящей из частиц водного льда, где, по-видимому, совмещаются такие благоприятные для усиления электрического поля условия, как умеренная температура (250—270 К), интенсивная конвекция и высокая концентрация вещества облаков (1—10 г/м³). Возможность молний на Марсе исключена, хотя вероятна генерация электрического поля в атмосфере в периоды сильных пыльных бурь, причем знак электрического поля зависит от химического состава пылевого аэрозоля. Так, например, при наличии частиц глинистых минералов возникают лишь отрицательные градиенты потенциала и отрицательные объемные заряды. Противоположная ситуация наблюдается при наличии силикатных частиц. Следует считать вероятным образование молний на Сатурне, Уране и Нептуне с их мощными атмосферами и возможной интенсивной конвекцией, а также на Ио, где наблюдаются сильные вулканические извержения, и кометах, когда они приближаются к Солнцу.

Анализируя возможности возникновения молниевых разрядов в атмосферах планет, Риннерт [171] отметил, что для этого должны быть выполнены три главных условия: 1) достаточное количество компонента, способного подвергаться электризации (капли, кристаллы, частицы аэрозоля); 2) существование микромасштабного механизма заряжения частиц (функционирование подобного механизма зависит от особенностей состава, структуры и динамики атмосферы); 3) наличие механизма разделения зарядов на расстоянии нескольких километров. Кроме воды, подходящим веществом частиц могут быть аммиак и серная кислота (но не углекислота или метан, наличие которых делает маловероятными молнии на Марсе и Титане). Наличие ионосфер планет, генерирующих собственные низкочастотные радишумы и препятствующих прохождению сигналов снизу, практически исключает возможность обнаружения молний по данным наземных наблюдений в радиодиапазоне. Не меньшие трудности возникают и при использовании видимой области спектра.

Риннерт [171] предпринял детальный анализ структуры и динамики атмосфер планет, который позволяет предположить возможность молний на Юпитере, Сатурне и, по-видимому, на Венере.

Как уже отмечалось, со многих АМС на различных планетах наблюдались импульсные низкочастотные радишумы и (или) световые вспышки, которые были интерпретированы как молниевые разряды, хотя во всех случаях такую интерпретацию нельзя считать однозначной. На Венере и Юпитере были зарегистрированы как световые вспышки, так и радиочастотные импульсы, но их наблюдения не были одновременными и пространственно совмещенными. Все оптические вспышки, приписываемые молниям, были зарегистрированы при помощи аппаратуры, созданной для других целей. Радиочастотные данные в лучшем случае содержат информацию о частотном спектре РЧ импульсов (сведения о форме волнового фронта отсутствуют). Оценки частоты предполагаемых

молниевых разрядов, их мощности и других характеристик следует рассматривать как условные.

Для надежной идентификации РЧ сигналов как молниевых необходимы измерения их временной динамики (характеристик импульсов и формы волнового фронта). Поскольку любая планетарная атмосфера отличается от земной, значительными должны быть и различия в молниевых разрядах. Если на Земле наиболее детально изучены разряды между облаками и земной поверхностью, то на других планетах подобные разряды вообще не существуют, поскольку у Юпитера и Сатурна нет аналогичной поверхности, а на Венере она находится на расстоянии около 50 км от облаков, причем промежуточная плотная атмосфера является сильно диэлектрической.

При помощи аппаратуры, установленной на СА «Венера-11, -12», были впервые зарегистрированы проявления молний в форме радиочастотных вспышек на другой планете; они были подтверждены наблюдениями с орбитальных аппаратов. Остается, однако, не ясным, происходят эти разряды в облаках или они связаны с вулканическими извержениями. Облака на Юпитере и Сатурне, в которых могут возникать молниевые разряды, имеют гораздо большие размеры, чем на Земле, и это определяет большую мощность разрядов. Наиболее убедительными свидетельствами внеземных молний являются световые вспышки, зарегистрированные на изображениях Юпитера, а также волны вистлеров. Применение тех же методов для обнаружения молний на Сатурне не дало положительных результатов. Однако такое уникальное явление, как электростатический разряд, может служить индикатором гроз в экваториальной атмосфере Сатурна. Приведенная в табл. 4.6 сводка отчасти основана на принятии тех же характеристик молний, что и на Земле (эти случаи отмечены звездочкой). Частота молний z выражена в км⁻²·с⁻¹ применительно к локальным зонам штормов и в км⁻²·год⁻¹ в остальных случаях.

Ксанфомалити [138] предпринял попытку обоснования воздействия вулканических извержений на Венере как исходного фактора, определяющего взаимосвязь различных наблюдаемых явлений (электрические разряды в приповерхностном слое атмосферы, изменения концентрации надоблачной субмикронной дымки, микроструктура облачного покрова). В работе [138] получены оценки, свидетельствующие о возможности интерпретации интенсивной надоблачной дымки из частиц с преобладающим радиусом 0,23—0,24 мкм, возникшей в 1977—1978 гг. (и частично в начале 1979 г.) как газозной трансформации сернистого газа, выброшенного в атмосферу в результате небольшого числа вулканических извержений.

Еще одним индикатором происшедших извержений были низкочастотные спорадические изменения электрического поля в атмосфере Венеры, которые первоначально приписывались молние-

АМС	Наблюдаемые проявления	Количественные характеристики
Венера		
«Венсра-11, -12, -13, 14» («Гроза»: 10; 18; 36; 80 кГц)	Радиочастотные импульсы 30 с ⁻¹ ; спектральный индекс от -1 до -2	Локальные источники (поперечники 120—150 км, на расстоянии 1000—1500 км)*; $z=1,5 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (зона шторма)
ОА «Пионер—Венера» (датчик электрического поля: 0,1; 0,73; 5,4; 30 кГц)	567 радиочастотных импульсов на ночной стороне за 1185 витков	Вистлеры, возникающие в поясе широт $\pm 32^\circ$, концентрирующиеся в районе вулканического происхождения: $z < 2,7 \text{ км}^{-2} \times \text{год}^{-1}$; ($z < 10 \text{ км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$)*
ОА «Пионер—Венера» (датчик звезд) «Венсра-9» (спектрометр)	Не обнаружено Продолжающиеся 70 с серии всплесков длительностью 0,25 с при частоте импульсов 100 с ⁻¹ на ночной стороне, активная зона 5·10 ⁴ км ² на площади 3,5·10 ⁷ км ² ; плоский спектр эмиссии; при $\lambda=0,45 \dots 0,75 \text{ мкм}$ световой поток $F=2,6 \times 10^6 \text{ Вт/нм}$	10—20 разрядов для $z=2 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (зона шторма), $z=45 \text{ км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ (полоса широт $\pm 32^\circ$); мощность $1,7 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ на разряд в видимой области спектра (возникают в облаках)
Юпитер		
«Вояджер-1» (изображения)	20 ярких пятен за 192 с на площади 10 ⁹ км ² ; мощность 10 ⁹ —10 ¹⁰ Дж на вспышку	$z=3 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$; мощность $2,5 \cdot 10^9 \text{ Дж}$ на оптическую вспышку; $1,7 \cdot 10^{12} \text{ Дж}$ — суммарная мощность; всплески; ($z=4 \text{ км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$)*
«Вояджер-1, -2» (эксперимент по изучению плазменных волн)	167 сигналов вистлеров (2—7 кГц); частота импульсов 0,12 с ⁻¹	Возникают вблизи 66° широты: $z=40 \text{ км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$; $z=4 \cdot 10^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$
Сатурн		
«Вояджер-1, -2» (радиоастрономическая аппаратура, 0,02—40 ГМц)	Эпизодические электростатические разряды (периоды 10 ч; 10 мин) широкополосные радиовсплески (0,02—40 МГц), продолжительность 30—250 мс, частота 0,2 с ⁻¹	Электрическая активность в испытывающих «сверххвращение» облаках вблизи экватора, 60° долготы $\times 3^\circ$ широты, $z=3 \times 10^{-2} \text{ км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$

вым разрядам, но последующее определение высоты их локализации, составляющей меньше 30 км, побудило предположить их обусловленность вулканическими извержениями, тем более, что разряды концентрировались в предполагаемых районах вулканической активности. Гипотезе о наличии извержений противоречат данные об отсутствии аэрозоля в нижней тропосфере Венеры. Эти данные, относящиеся к отдельным районам, нельзя, однако, считать глобально репрезентативными.

Тэйлор и Гребовски [203] предложили альтернативное объяснение происхождения импульсных низкочастотных изменений электрического поля (возмущений плазменных волн), как обусловленных не молниями, а ложбинами распределения ионизации (спадами электронной концентрации) в ночной ионосфере Венеры, выявленными по наблюдениям при помощи установленного на АМС «Пионер—Венера» ионного масс-спектрометра. Такие ложбины имеют протяженность до 1° широты $\times 10^\circ$ долготы и располагаются на высотах от менее 250 км до более 1000 км.

Обсуждаемую интерпретацию можно рассматривать как вполне естественную, поскольку ослабление ионизации на ночной стороне планеты связано с интенсификацией вертикального магнитного поля, которая благоприятствует распространению волн низкочастотных вистлеров вверх или вниз. В условиях ионосферы Венеры распространение вистлеров происходит вдоль магнитных силовых линий на частотах ниже электронной гирочастоты. Поэтому рассматриваемые ночные ложбины оказываются индикаторами взаимодействия ионосферы с солнечным ветром и межпланетным магнитным полем и в связи с этим следует ожидать возмущений плазмы в зонах ложбин, включая возмущения дрейфа ионов, градиентов электрического поля и потоков супертепловой плазмы, что определяет условия, благоприятствующие усилению изменчивости плазменных волн. В пользу предложенной интерпретации свидетельствует тот факт, что пространственное распределение ложбин ионизации на ночной стороне планеты относительно топографии поверхности очень сходно с распределением низкочастотных возмущений электрического поля. Подобная интерпретация не противоречит, однако, возможности существования молний и вулканизма на Венере.

Выполненные Кастингом и Поллаком [118] расчеты эволюции венерианской атмосферы привели к выводу, что первоначальное количество воды на Венере было эквивалентно содержанию воды в земных океанах, а последующая потеря воды за сравнительно короткий промежуток времени обусловлена гидродинамическим потоком. Однако в таком случае коэффициент обогащения дейтерием должен был бы оказаться много больше измеренного значения 150, а время перехода от фазы эволюции атмосферы, когда гидродинамический поток перестал существовать, к современной атмосфере — в 15 раз более продолжительным. Для устранения

подобного противоречия Кастинг и др. [119] предположили наличие непрерывной и долговременной дегазации, а также более высокой температуры «холодной ловушки», чем современная (170 К), на протяжении всей истории эволюции планеты.

В. А. Краснопольский [136] получил количественные оценки потери водорода Венерой при упомянутых предположениях и в связи с этим подверг пересмотру некоторые из результатов указанных работ. Последнее относится главным образом к изменениям оценок соотношения между отношениями смеси элементарного водорода на уровнях гомопаузы и вблизи верхней границы облаков, а также пересыщения водяного пара у холодной ловушки, которые приводят к возрастанию отношения смеси H_2O у холодной ловушки примерно в 10 раз и к ряду других последствий. В работе [136] сделаны расчеты нетепловой диссипации водорода и дейтерия с учетом повышенного уровня экстремальной УФ солнечной радиации, типичного для периода ранней эволюции Солнечной системы, а также пересыщения водяного пара у холодной ловушки. Если предположить, что на протяжении всей истории эволюции Венеры количество CO_2 оставалось неизменным и равным современному, то вывод о первоначальном количестве воды, равном содержанию воды в современном земном Мировом океане, согласуется с наблюдаемым в настоящее время соотношением концентраций дейтерия и водорода при условии, что дегазация водяного пара составляла около $10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ с последующим быстрым возрастанием до $10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, а затем постепенным уменьшением до современного значения $2 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Однако более вероятным является значительно меньшее количество воды на Венере — около 1 % содержащегося в земном Мировом океане. Это означает, что первоначальные материалы Венеры и Земли не были полностью одинаковыми по составу. Такое предположение согласуется с тем фактом, что современная концентрация нерадиогенного аргона-36 примерно на два порядка выше на Венере, чем на Земле. Поэтому внутренняя часть первоначальной солнечной туманности не была, по-видимому, хорошо перемешанной, а гидратированные силикаты, термохимически устойчивые при низких температурах, существовали вблизи земной орбиты, но не существовали вблизи венирианской.

В связи с обсуждаемыми оценками рассмотрим некоторые данные измерений концентрации водорода в атмосфере Венеры. Установленные на АМС «Венера-11» и «Венера-12» спектрометры для жесткой УФ радиации позволили осуществить измерения резонансно рассеянного L_α -излучения (121,6 мкм) и линии He-I на длине волны 58,4 нм. Осуществленная Берто и др. [77] обработка результатов лимбовых наблюдений дала возможность восстановить вертикальный профиль концентрации водорода в диапазоне высот от 250 км (уровень экзобазы) до 50 тыс. км. Анализ полученных результатов показал, что во внутренней части экзобазы (на высотах меньше 2000 км) вертикальный профиль характеризуется следующими значениями параметров m (концентрация атомов на

уровне экзобазы), M (общее содержание атомов в столбе атмосферы) и T (температура экзосферы):

	$m \text{ см}^{-3}$	$M \text{ см}^{-2}$	$T \text{ К}$
«Венера-11» (79° ю. ш.)	$4^{+2}_{-2} \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{12}$	300 ± 25
«Венера-12» (59° ю. ш.)	$6^{+1}_{-2} \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{12}$	275 ± 25

Общее содержание водорода в слое 250—110 км, где проявляется поглощение углекислым газом, оказалось в 3—6 раз меньше соответствующего известным аэрокосмическим моделям. Обусловленная гелием оптическая плотность атмосферы выше уровня 141 км оказалась равной 3, что соответствует концентрации гелия на высоте 150 км $1,6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ (это примерно в 3 раза меньше полученного по данным АМС «Пионер—Венера», но согласуется с найденным ранее по данным АМС «Маринер-10»: $(2 \pm 1) \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$).

Пакстон и др. [154] проанализировали полученные по данным установленного на АМС «Пионер—Венера» УФ спектрометра результаты наблюдений L_α -излучения атомарного водорода в атмосфере Венеры за шесть витков. Данные, относящиеся к периферии в подсолнечной зоне, привели к выводу, что при температуре экзобазы 305 К концентрация водорода на этом уровне равна $(5 \pm 2) \times 10^4 \text{ см}^{-3}$, а общее содержание в слое 110—200 км составляет $(2,4 \pm 0,8) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Оценки восходящего потока атомов водорода на уровне экзобазы дали значение $(7,5 \pm 2,5) \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Рассмотренные данные, относящиеся к апоцентру в утреннее и вечернее время, позволили сделать следующие выводы: 1) наблюдаемые профили излучения в зоне лимба согласуются с найденными ранее Бристоном и др. (1980 г.); 2) предложенная Хединым и др. (1983 г.) модель поля температуры хорошо согласуется с данными наблюдений в утреннее время, но расходится с результатами наблюдений в вечерние часы; 3) рассчитанные теоретически профили свечения в зоне лимба чувствительны к слабым вариациям содержания водорода на уровне экзобазы в зависимости от зенитного угла Солнца. Достигающее Венеры L_α -излучение Солнца в центре линии, обеспечивающее согласие с обсуждаемыми данными наблюдения, составляет $8 \cdot 10^{12}$ фотонов/($\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{нм}$).

Тэйлор и др. [201] проанализировали результаты прямых измерений концентрации нейтрального водорода в атмосфере Венеры (H) в период 1979—1980 гг. при помощи установленных на орбитальном аппарате «Пионер—Венера» ионного и нейтрального масс-спектрометров. За время наблюдений планета совершила почти три оборота вокруг Солнца, что сделало возможным анализ суточного хода. Источником информации о содержании водорода служили данные о зарядовом обмене между O^+ , H^+ , O и CO_2 . Рассматриваемые данные наблюдений показали, что обнаруженное ранее «вздутие» в суточном ходе концентрации водорода m (H)

вблизи утреннего терминатора продолжало существовать при максимальной концентрации $(2 \dots 5) \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ на высотах ниже 165 км, которая превосходит концентрацию водорода на дневной стороне Венеры в 400 раз. Часто наблюдаются достигающие пятикратных значений вариации m (Н) ото дня ко дню, которые можно объяснить возмущениями, обусловленными взаимодействием с солнечным ветром. Наличие подобных кратковременных вариаций, а также изменение местного времени наступления вздутия серьезно осложняют выявление межгодовой изменчивости m (Н), которая не была обнаружена. В период от первого суточного цикла в начале 1979 г. до третьего цикла в середине 1980 г. уменьшение потока жесткой УФ солнечной радиации не превосходило 10 %, что согласуется с данными об отсутствии межгодовой изменчивости концентрации водорода.

Исследования при помощи АМС «Венера-11, -12» и «Пионер—Венера» внесли серьезный вклад в понимание состава, структуры и процессов формирования облачного покрова Венеры. Следует думать, что исследования процессов трансформации аэрозоля на Венере окажутся полезными и для лучшего понимания влияния аэрозоля на земной климат. Венера представляет собой прекрасную природную лабораторию для изучения глобального взаимодействия облаков, радиации и климата в условиях малой силы Кориолиса, отсутствия температурных контрастов суши и моря. Имеется ряд причин ожидать изменений климата на Венере в масштабах 2—3 лет: 1) крупные глобальные изменения такого временного масштаба обнаружены при анализе наземных УФ изображений планеты (например, появление и исчезновение ярких облаков в полярных районах); 2) при наземных измерениях поляризации для всего диска на длине волны 365 нм выявлена долговременная изменчивость вклада рэлеевского рассеяния; 3) время радиационной релаксации в слое основного облачного покрова Венеры (45—65 км) варьирует от десятков до сотен суток; 4) постоянные времени различных процессов в облаках имеют порядок величины 10^7 с для размеров частиц, составляющих видимый облачный покров Венеры.

Как уже отмечалось, при анализе изображений облачного покрова выявляется сходство данных АМС «Пионер—Венера» с результатами предшествующих наблюдений. Была обнаружена, например, известная Y-образная структура облачного покрова, возникшая с периодичностью около четырех суток. Для периодов между проявлениями Y-образной неоднородности характерны яркие «шапки» в районах полюсов и относительно темная область в низких широтах при наличии случайно распределенных ярких неоднородностей облачного покрова вблизи лимба.

От экваториальной стороны полярного кольца облачности часто отделяется небольшой аппендикс, пересекающий круги широт под значительным углом. При сопоставлении двух изображений, разделенных интервалом времени 5—6 ч, отчетливо выявляется наличие противоположного вращению планеты движения пла-

нетарного масштаба (обратной циркуляции) и мезомасштабных особенностей циркуляции. Хорошо видна в низких широтах неоднородная структура облачного покрова с окаймленными яркими и светлыми ободками ячейками, обнаруженная ранее на изображениях с «Маринера-10». Анализ увеличенных изображений свидетельствует об «организации» ячеек в скопления, имеющие большую горизонтальную протяженность. Ячейки наблюдаются даже в умеренных широтах. Имеют место и дугообразные волны, замеченные по данным «Маринера-10».

Первые изображения, полученные при фазовом угле около 120° (наклонное визирование), характеризуются низкими контрастами яркости (не более 5 %) по сравнению с наблюдавшимися на изображениях с «Маринера-10» при фазовом угле около 25° (до 30 %). Относительно низкие контрасты при наклонном визировании позволяют предположить, что поглощение УФ радиации, ответственное за контрасты яркости УФ изображений, происходит под верхней частью ярких сернокислотных облаков (на последующих изображениях, относящихся к фазовому углу около 90° , контрасты значительно возросли).

По картам глобального распределения степени поляризации обнаруживается положительная поляризация на длине волны 270 нм, которая объясняется рэлеевским (молекулярным) рассеянием толщей газа в облаках и над облаками. Отрицательная поляризация на более длинных волнах определяется влиянием рассеяния на каплях серной кислоты, имеющих радиус около 1 мкм, а положительные значения поляризации на этих длинах волн (особенно 935 нм) в полярных районах и вблизи терминатора можно объяснить присутствием тонкого слоя дымки из мелких частиц над основным облачным слоем. Если предположить, что показатель преломления этих частиц тот же, что показатель преломления капель основного слоя (1,44), то радиус частиц дымки не должен превышать 0,4 мкм. Грубо приближенные оценки оптической плотности слоя дымки в видимой области спектра дают значения 0,05—0,1. По-видимому, дымка расположена в стратосфере вблизи уровня 10 гПа.

На большом (БСА) и трех малых (САД, САН, САС) спускаемых аппаратах АМС «Пионер—Венера» были установлены нефелометры, предназначенные прежде всего для исследования вертикальной структуры облаков. Кроме того, была поставлена задача локализации по высоте источника поглощения ультрафиолетовой радиации атмосферой. Принцип действия нефелометра состоит в регистрации интенсивности света, рассеянного назад под углом 175° по отношению к падающему свету. Нефелометры функционировали начиная с высоты 65 км до момента посадки. Аппаратура САД работала в течение 64 мин после жесткой посадки; в этом случае получены данные измерений на поверхности Венеры.

Бламон и Ражент [79] проанализировали данные нефелометрических измерений на СА «Пионер—Венера», а также данные измерений при помощи входившего в комплекс нефелометрической аппаратуры радиометра с каналами в УФ (около 365 нм) и видимой (около 530 нм) областях спектра. Существенно, что УФ канал чувствителен также к радиации длин волн около 745 нм, вклад которой исключался при обработке данных. Измерения начались с высот 66, 64, 61 и 65 км соответственно на САД, САН, САС и БСА. При сопоставлении данных СА «Пионер—Венера» с данными АМС «Венера-9—Венера-12» выявлены особенности вертикальной структуры облаков в глобальных масштабах с налагающейся на них локальной изменчивостью. По нефелометрическим данным четко обнаруживается четырехслойная структура облачного покрова (рис. 4.23). Для самой верхней части зондируемого слоя (верхний слой облачности, или слой *D*) характерно наличие неоднородностей и клочковатой структуры при резком усилении сигнала рассеяния назад на высотах 63 км (САД) и 64 км (БСА); САН не зарегистрировал в слое 63,6—61,7 км заметного рассеяния.

По данным БСА показатель преломления частиц равен 1,44 на длине волны 900 нм. Расположенный ниже слой *C* (средний облачный слой) является, по-видимому, планетарным, отделен от слоя *D* «ложбиной» (высоты 56—58 км) и характеризуется возрастанием сигнала обратного рассеяния с уменьшением высоты, за исключением участка спуска БСА, где этот сигнал практически не зависит от высоты. По данным БСА показатель преломления равен 1,40 для частиц моды 3 и 1,44 для меньших частиц (моды 1 и 2).

Слой *B*, или нижний облачный слой (51—48 км), оказался самым изменчивым; он наиболее плотен на участках спуска БСА и САН, но практически отсутствует по данным САД и САС. В первых двух случаях показатели преломления частиц составляют 1,32 (мода 3) и 1,44 (моды 1 и 2). Самая нижняя часть облачного покрова (предоблачный слой *A*) на участке спуска БСА состоит из мелких частиц (мода 1), которые представляют собой, по-видимому, капли концентрированного раствора серной кислоты. Во всех случаях нижняя граница слоя *B* располагается на высоте 47—49 км. Подоблачная атмосфера (ниже 45 км), как правило, не содержит рассеивающих частиц. Исключение составляют тонкие слои дымки, зарегистрированные на высотах 44,3 и 6,0—5,8 км, по данным САН, и на высоте около 6,5 км, по данным САС. Данные радиометрических измерений, касающиеся вертикальной структуры облачного покрова, согласуются с результатами нефелометрических наблюдений. Ультрафиолетовая радиация практически отсутствует ниже 25—30 км.

Анализ временной изменчивости сигнала обратного рассеяния нефелометра САД после посадки свидетельствует о том, что грунт в месте посадки состоит из слабо связанного мелкодисперсного материала, часть которого (пыль) поднялась в воздух после

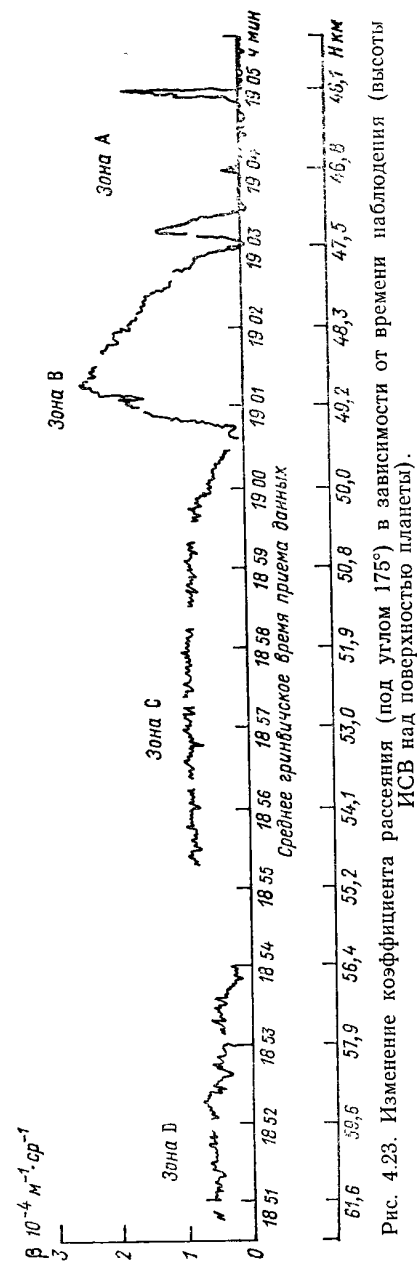


Рис. 4.23. Изменение коэффициента рассеяния (под углом 175°) в зависимости от времени наблюдения (высоты ИСВ над поверхностью планеты).

посадки СА, а затем осела на поверхность в течение нескольких минут, и атмосфера вблизи СА снова стала свободной от частиц.

Установленный на БСА спектрометр размеров облачных частиц (СРОЧ) впервые позволил выполнить исследования микроструктуры облачного покрова Венеры на различных высотах. Фотоэлектрический счетчик частиц СРОЧ обеспечивает определение размеров (в диапазоне 0,5—500 мкм) и концентрации частиц, причем его показания относительно нечувствительны к влиянию формы и ориентации частиц. Прибор начал функционировать на высоте 67 км и работал, пока не достиг поверхности, что позволило получить данные о микроструктуре (в диапазоне 0,5—500 мкм различается 38 классов размеров) с разрешением по высоте около ± 400 м. Проанализированные Кнолленбергом и Хантеном [122, 124] результаты позволили построить вертикальные профили счетной и массовой концентрации частиц, а также коэффициента экстинкции на длине волны 600 нм, вычисленного по измеренной микроструктуре в предположении, что коэффициент преломления равен 1,5. При определении массовой концентрации принята плотность вещества частиц 1,8 г/см³.

При анализе результатов измерений выявлено четкое расслоение облачного покрова на четыре зоны с различными свойствами. Три верхние зоны (I, II и III) расположены под слоем тонкой дымки IV. Ниже 31 км СРОЧ не зарегистрировал частиц вообще. Самой неожиданной особенностью данных о микроструктуре явилось обнаружение ее многомодальности (многовершинности кривой распределения концентрации частиц по размерам). Как уже отмечалось, выполненные ранее наземные поляриметрические наблюдения привели к выводу об очень узкой микроструктуре частиц облаков при диаметре около 2 мкм и возможности присутствия более крупных частиц серы (10 мкм), предположение о которых было высказано для объяснения желтой окраски планеты Венера.

Обсуждаемые данные наблюдений подтверждают существование двух упомянутых мод (максимумов) микроструктуры, но имеет место также и третья мода (диаметр около 1 мкм) и еще одна зона крупных частиц (10 мкм). По их расположению в слое с оптической плотностью, равной 5—10, крупные частицы средней зоны можно рассматривать как предполагавшиеся ранее частицы серы. Однако крупные частицы в нижней части облачного покрова являются, по-видимому, каплями серной кислоты.

Первоначальный анализ данных измерений при помощи СРОЧ позволил обнаружить многомодальность микроструктуры венерианских облаков. В табл. 4.7 указаны основные характеристики трех мод микроструктуры слоев облачного покрова: верхнего I (интервал высот 68—58 км, температура 230—288 К), среднего II (58—52 км, 288—346 К), нижнего III (52—48 км, 346—364 К) и слоя дымки IV (48—31 км, 364—493 К). Эти данные свидетельствуют о специфичности химического состава частиц различных мод или во всяком случае об их различном происхождении.

Таблица 4.7

Микроструктура и химический состав венерианских облаков

Мода	Модальный диаметр, мкм	Размер частиц, мкм	Слой облаков	Химический состав	N см ⁻³			
					I	II	III	IV
1		<1,5	I, II, IV	S, различные аэрозоли	150	25	100	10
2	2—3	1,5—35	I, II, III	H ₂ SO ₄ , твердые включения	50	50	50	
3	7—8	5—35	II	S (?), H ₂ SO ₄ (?)		10	30	
			III	H ₂ SO ₄		10	30	

В верхней зоне облаков преобладают мелкие частицы диаметром 0,6—4 мкм при довольно высокой счетной концентрации (300—400 см⁻³), но относительно низкой массовой концентрации (около 1 мг/м³). Коэффициент экстинкции в видимой области спектра несколько превышает 1 км⁻¹, что эквивалентно оптической плотности слоя 62,5—58 км, равной 6. Если состав облака в слое 67—62,5 км такой же, то оптическая плотность верхней зоны окажется вдвое большей.

По данным АМС «Вега» основным компонентом облачного аэрозоля Венеры является сера. Оценка нижней границы содержания сернокислотного аэрозоля по данным о масс-спектрах на высотах 62—54 км дала значения около 2,0 мг/м³. Обнаружено также наличие хлора. Рентгенорадиометрический эксперимент показал, что сера существует в диапазоне высот 63—47 км и ее среднее содержание составляет 5,8 мг/м³, а хлор — в интервале высот 61—59 км в количестве 4,1 мг/м³. Данные измерений, относящиеся к слою 52—47 км, свидетельствуют о вероятном существовании в этом слое фосфора при средней концентрации 7,7 мг/м³. Согласно данным газового хроматографа, средняя массовая концентрация серной кислоты в слое 63—48 км равна примерно 1 мг/м³.

Анализ данных фотоэлектрического счетчика частиц аэрозоля привел к результатам, качественно согласующимся с данными АМС «Пионер—Венера» (счетная концентрация частиц диаметром больше 0,4 мкм варьирует в пределах 10—10² см⁻³, причем облака имеют отчетливую слоистую структуру). Основным поглотителем УФ радиации (длины волн 0,23—0,40 мкм) оказалась газообразная сера S₈ при отношении смеси 5—25 млн⁻¹ на высотах соответственно 25—45 км.

Данные СА «Пионер—Венера», полученные для нескольких меньших высот, показывают, что существует широкий диапазон размеров частиц с модальным диаметром около 1,2 мкм и призна-

ками бимодальности микроструктуры на некоторых высотах (предшествующие поляриметрические наблюдения привели к среднему диаметру около 1,6 мкм). В средней зоне облачного покрова (51—56 км) имеет место уменьшение концентрации частиц до 100 см^{-3} , но возрастание как коэффициента экстинкции (до 2 км^{-1}), так и массовой концентрации (5 мг/м^3) за счет укрупнения частиц (до 5—25 мкм). Оптическая плотность этой зоны составляет 12,5. Микроструктура всей зоны является трехмодальной при наличии очень узкой 3,5-мкм моды, разделяющей мелкие (1 мкм) и крупные частицы.

Наиболее плотной является нижняя зона (49—51 км). Счетная концентрация частиц заметно не превышает наблюдаемую в верхней зоне, но коэффициент экстинкции и массовая концентрация оказываются более высокими на один и два порядка соответственно. Эта зона представлена наиболее крупными частицами. Непосредственно под ней находится предоблачный слой, характеризующийся, по-видимому, тем же составом, но меньшим размером частиц. Суммарная оптическая плотность нижней зоны и предоблачного слоя равна примерно 13, т. е. почти половине интегральной оптической плотности всего облачного покрова. Микроструктура нижней зоны является двухмодальной с преобладанием крупных (10 мкм) и очень мелких частиц. В расположенном ниже слое 32—48 км находится устойчивая тонкая дымка из частиц диаметром около 1 мкм при концентрации от 1 до 20 см^{-3} , верхняя часть которой является относительно более плотной. Ее массовая концентрация и оптическая плотность очень малы.

Анализ данных измерений позволяет заключить, что частицы 3,5-мкм моды являются жидкими (каплями серной кислоты), а более крупные частицы — твердыми и несферичными (возможно, это частицы серы), но не исключена вероятность очень широкого спектра размеров жидких капель. Характер вертикального профиля концентрации частиц 3,5-мкм моды позволяет предположить существование их источника в верхней и стока в нижней части облаков при нисходящем потоке частиц, обусловленном перемешиванием и гравитационным оседанием. По-видимому, существует фотохимический источник серы и серной кислоты вблизи или выше уровня 57 км (верхней границы средней зоны). Это означает, что ультрафиолетовая солнечная радиация не должна проникать далеко в глубь облака. Можно предположить, что крупные частицы серы образуются вблизи уровня 57 км и медленно оседают. Достигая высоты 51 км, они начинают испаряться, и на высоте 48 км их остатки плавятся, формируя частицы слоя дымки. Размер крупных частиц (больше 30 мкм), наблюдаемых в средней и нижней зонах, может удваиваться за счет слияния при падении в слое 49—51 км, что делает вероятным выпадение частиц в форме осадков. В целом при исследовании микроструктуры выявлена гораздо более сложная картина венерианских облаков, чем ожидалось. Привлекает внимание роль больших частиц в возвращении массы вещества в нижние слои атмосферы.

Уточненные позднее (в сторону повышения) значения температуры определили необходимость коррекции концентрации H_2SO_4 в нижнем слое облаков, а данные радиометрических измерений уменьшили вероятность того, что частицы моды 3 в среднем слое состоят из серы [124]. При более полном анализе данных СРОЧ: 1) подкреплена идентификация частиц узкой (практически монодисперсной) моды 2 в среднем слое (теперь ясно, что то же самое справедливо для нижнего слоя) как капель серной кислоты; 2) усилилась аргументация в пользу существования широкой моды капель из H_2SO_4 в нижнем слое; 3) обнаружен пронизывающий всю толщу слоя облачности мелкодисперсный аэрозоль (дымка).

Данные радиометрических и нефелометрических измерений уменьшают вероятность того, что частицы моды 3 в среднем слое состоят из серы. Осредненная микроструктура для слоя 53—57 км наилучшим образом описывается гауссовым распределением при модальном диаметре 2,7 мкм и дисперсии не более 0,65 мкм. Обусловленная модой 2 оптическая плотность этого слоя составляет около 3.

Если в среднем слое облаков имеет место четкое разделение частиц мод 1 и 2, то в верхнем слое подобное разделение начинает пропадать в результате усиления моды 1 и ослабления моды 2, хотя бимодальность и остается заметной до уровня 64,8 км. Модальный диаметр уменьшается с ростом высоты (53—65 км) от 2,5 до 2 мкм, причем это уменьшение происходит особенно быстро в слое 57—58 км. По-видимому, такой переходный слой представляет собой границу динамического режима или химического состава облаков: здесь происходят изменения размеров и концентрации частиц мод 1 и 2, а ниже этого уровня появляются частицы моды 3. Следует предположить, что аналогичная граница разделяет также средний и нижний слои облаков.

Наиболее вероятным компонентом нижнего слоя, наблюдаемого на всей планете, является серная кислота. Частицы дымки (мода 1) являются, по-видимому, поличастицами, состоящими как из летучих, так и из нелетучих компонентов. Для микроструктуры дымки характерно наличие протяженного «хвоста» мелких частиц (именно поэтому в табл. 4.7 не указаны нижний предел диапазона размеров и модальный диаметр). Этот «хвост» можно аппроксимировать степенным распределением, изменяющимся в пределах облачного слоя от d^{-3} до d^{-4} (d — диаметр частиц), что аналогично характеристикам земного аэрозоля. Однако на Венере концентрация частиц дымки на 1—2 порядка больше, и это определяет (по земным стандартам) высокий уровень загрязненности венерианской атмосферы аэрозолем. Последнее можно приписать отсутствию на Венере осадков, которые могли бы очищать атмосферу от пыли. В условиях Венеры вероятны полосы падения, которые могут лишь переносить аэрозоль в нижерасположенную часть облачного слоя, где происходит испарение летучих компонентов,

а оставшиеся ядра снова переносятся вверх. Субмикронный аэрозоль существует и над облаками, образуя планетарный слой дымки, наблюдавшийся, например, с «Маринера-10» на высотах 75—85 км. Нелетучий компонент аэрозоля может иметь метеорное происхождение.

В облачном слое часть аэрозольных чатиц должна служить ядрами конденсации при образовании капель H_2SO_4 (об этом свидетельствует корреляция между концентрацией аэрозоля и облачных капель). Для объяснения механизма поглощения солнечной радиации облаками следует предпринять поиски поглощающих частиц, размеры которых меньше рассеивающих.

Оценка потока массы падающих частиц (в предположении, что они сферические и имеют плотность $1,8 \text{ г/см}^3$) дала максимальное значение $2,8 \cdot 10^{-3} \text{ г/(см}^2 \cdot \text{с)}$. Если принять это значение как типичное для глобальных условий, то должен иметь место направленный вверх компенсирующий поток вещества в газовой фазе со скоростью несколько сантиметров в секунду, которая вполне соответствует наблюдаемой в земных слоистых облаках. Рассматриваемый поток массы обуславливает поток тепла (с учетом скрытого тепла и затрат тепла на испарение), равный 8 Вт/м^2 , что составляет около $1/4$ эффективного потока коротковолновой радиации. Хотя эта оценка очень приближенна, из нее вытекает необходимость учета фазовых превращений при вычислениях теплового баланса атмосферы.

Из полученных результатов следует, что, вероятнее всего, венерианские облака являются слоистыми, а не слоисто-кучевыми. Микрофизические данные выдвигают целый ряд вопросов, ответы на которые, по-видимому, потребуют лабораторных исследований: 1) может ли предположение о наличии в облаках твердых частиц серы удовлетворять ограничениям, налагаемым на частицы моды 3 в среднем слое; 2) каков возможный механизм роста капель H_2SO_4 , определяющий их планетарную монодисперсность в протяженной (по вертикали) толще облака; 3) каков механизм разделения зарядов в облаках, состоящих из сильного электролита, и могут ли в таких облаках происходить наблюдаемые процессы электризации и образования молний.

Как уже отмечалось, первоначальный анализ данных установленного на СА «Пионер—Венера» спектрометра размеров облачных частиц привел к выводу о трехмодальности микроструктуры облачного покрова Венеры. Естественно, что наиболее крупные частицы моды 3 (их средний радиус составляет около 4 мкм) вносят главный вклад в массу облаков и в ослабление радиации. Кнолленберг [125] отметил, однако, что комплексный анализ данных радиационных и микрофизических измерений выявил наличие некоторых расхождений результатов анализа данных. Так, например, по данным СРОЧ о частицах моды 3 значение оптической плотности облаков оказалось больше значения, полученного при интерпретации результатов измерений потоков коротковолновой радиации, а значение поперечника рассеяния назад больше значе-

ния, полученного по данным непосредственных нефелометрических измерений (при разумных предположениях о показателе преломления частиц).

Если считать частицы моды 3 сферическими (согласно данным СРОЧ, они асимметричны), то не согласуются результаты измерений концентрации частиц для перекрывающихся интервалов размеров частиц. Все это определило предположение о наличии в облаках Венеры кристаллических частиц неправильной формы, принятие которого позволило устранить отмеченные противоречия. Правильность этого предположения была, однако, подвергнута сомнению Туном и др. в связи с обнаруженными систематическими погрешностями СРОЧ, побудившими считать, что частицы моды 3 представляют собой всего лишь «хвост» распределения по размерам частиц моды 2.

В связи с этим Кнолленберг [125] предпринял повторный анализ данных СРОЧ, который привел к следующим выводам: 1) частицы моды 3 реально существуют независимо от того, рассматриваются ли они как кристаллические или как капли серной кислоты (выводы о систематических погрешностях сильно преувеличены, поскольку функционирование СРОЧ было вполне надежным); 2) результаты специальной калибровки по кристаллам снега оказались сходными с данными для Венеры, тогда как калибровка по каплям воды не обнаружила подобного сходства, что позволяет предполагать форму частиц асимметричной (хотя это требует дальнейших подтверждений); 3) если считать, что частицы моды 3 представляют собой капли серной кислоты, то это определяет необходимость неприемлемой корреляции микроструктуры для обеспечения согласия с наблюдаемыми значениями поперечников рассеяния и экстинкции.

На основе анализа эффекта высушивания в облачном слое, обусловленного серной кислотой, данных рентгеновской флуоресцентной спектроскопии (АМС «Венера-14») и оценок фотохимического образования серной кислоты В. А. Краснопольский [135] показал, что не только частицы венерианских облаков моды 2 (радиус 1—1,5 мкм), но и частицы моды 3 (радиус около 4 мкм) состоят из серной кислоты и (или) продуктов ее последующей трансформации. Обсуждаемые оценки получены при задании коэффициента перемешивания в слое облачности, равного $2 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{с}$.

Наличие в составе облаков треххлористого железа, обнаруженного по данным о поглощении УФ радиации (320—500 нм), по спектру рентгеновской флуоресценции (АМС «Венера-12»), путем расчетов восходящего потока FeCl_3 из средней части облачного слоя, а также согласие вычисленной концентрации конденсата FeCl_3 с его концентрацией в частицах моды 1 в средней и нижней частях облачного слоя, позволяет объяснить предполагаемую концентрацию треххлористого железа в растворе серной кислоты. Присутствие $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ как второго поглотителя солнечной радиа-

ции определяет локализацию поглощения верхней частью облачности, обусловленного превращением FeCl_3 в $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, вблизи границы раздела между верхней и средней частями слоя облачности. В работе [135] обсужден также возможный вклад других поглотителей, таких, как сера, пирсульфат аммония, нитрозилсерная кислота и др. Данные табл. 4.8 характеризуют наиболее вероятный состав облачного аэрозоля в различных слоях облачного покрова.

Таблица 4.8
Вероятный химический состав облачного аэрозоля

Слой	H см	Мода 1 ($r \approx 0,2$ мкм)
Верхняя дымка	90—70	H_2SO_4 (~85 %)
Верхний	70—57	H_2SO_4 (~85 %) + S_n
Средний	57—50	FeCl_3
Нижний	50—48	FeCl_3
Предоблачный	48—46	FeCl_3
Нижняя дымка	46—30	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ($r \approx 0,05 \dots 0,1$ мкм)
Слой	H км	Мода 2 ($r \approx 1,3$ мкм)
Верхняя дымка	90—70	H_2SO_4 (~85 %) + FeCl_3 (1 %) + S_n
Верхний	70—57	H_2SO_4 (~85 %) + $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (~1 %) + S_n
Средний	57—50	H_2SO_4 (~85 %) + $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (~1 %) + S_n
Нижний	50—48	H_2SO_4 (~85 %) + $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (~1 %) + S_n
Предоблачный	48—46	H_2SO_4 (~95 %) + $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (~1 %)
Нижняя дымка	46—30	—
Слой	H км	Мода 3 ($r \approx 3,7$ мкм)
Верхняя дымка	90—70	—
Верхний	70—57	—
Средний	57—50	H_2SO_4 (~85 %)
Нижний	50—48	H_2SO_4 (~95 %)
Предоблачный	48—46	—
Нижняя дымка	46—30	—

К настоящему времени стало ясно, что самая поразительная черта венерианского климата — очень высокая температура поверхности планеты — определяется парниковым эффектом атмосферы: хотя через толщу атмосферы проникает лишь небольшая доля солнечной радиации, этого оказывается достаточным для сильного нагревания поверхности при практически полной непрозрачности атмосферы для теплового излучения поверхности.

С целью получения данных о вертикальном профиле поглощения солнечной радиации венерианской атмосферой в составе ком-

плекса аппаратуры большого спускаемого аппарата АМС «Пионер—Венера» функционировал радиометр солнечного потока, предназначенный для измерений восходящих и нисходящих потоков радиации в диапазонах длин волн 0,4—1,0 и 1,0—1,8 мкм (Томаско и др. [205, 207]). Наличие парашюта БСА и его вращение

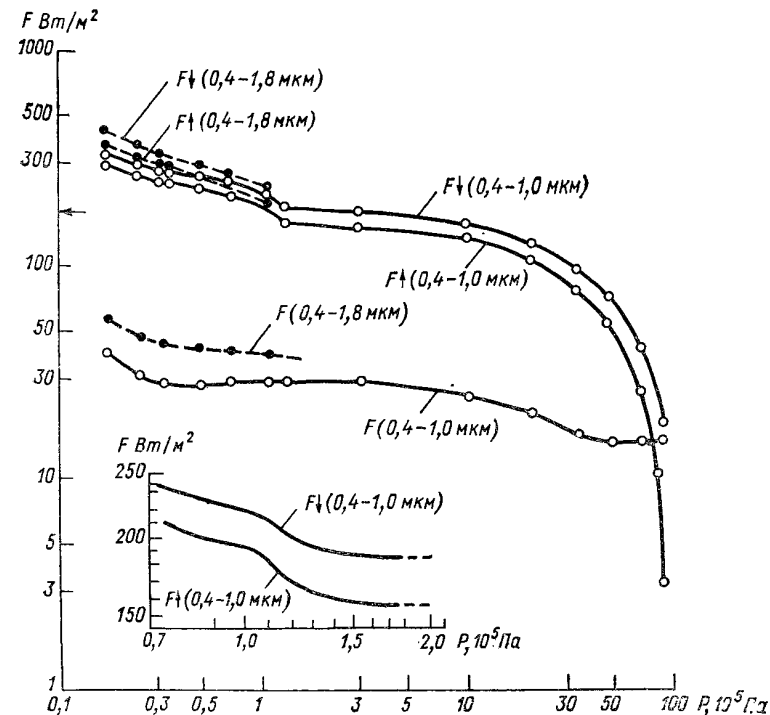


Рис. 4.24. Высотное распределение восходящих ($F\uparrow$), нисходящих ($F\downarrow$) и эффективных ($F = F\downarrow - F\uparrow$) потоков радиации для различных интервалов длин волн.

обусловили выбор узкоугольного (5°) радиометра, позволяющего измерять нисходящую коротковолновую радиацию для углов 102° и 142° . Для характеристики облачного слоя выполнены также измерения в узком канале 0,59—0,66 мкм при зенитных углах 60° и 142° .

Наличие данных об угловом распределении коротковолновой радиации позволяет рассчитать значения нисходящих ($F\downarrow$), восходящих ($F\uparrow$) и эффективных (F) полусферических потоков радиации (рис. 4.24), а также поглощение коротковолновой радиации различными слоями атмосферы. Вертикальные профили радиационных потоков в диапазоне 0,4—1,0 мкм построены по

390 точкам в интервале высот от уровня 185 гПа (высота 61 км) до поверхности планеты. Данные для диапазона 1,0—1,8 мкм (и, следовательно, 0,4—1,8 мкм) ограничиваются слоем $185-2 \times 10^3$ гПа. После дополнительной обработки будут получены данные для слоя 80—185 гПа.

При анализе результатов измерений выявлено наличие трех зон облачного покрова выше уровня $1,3 \cdot 10^5$ Па (около 49 км) и расположенной под ним ясной атмосферы. При зенитном расстоянии Солнца 67° в момент входа БСА в атмосферу поглощенная поверхностью Венеры коротковолновая радиация равна примерно 15 Вт/м^2 , что составляет около 2 % по отношению к внеатмосферной инсоляции.

Данные инженерных измерений свидетельствуют о том, что Солнце наблюдалось на уровне раскрытия парашюта (около 80 гПа), а оптическая плотность, равная 7 (когда Солнце практически незаметно), была достигнута в слое 80—185 гПа. Ниже уровня 185 гПа азимутальная зависимость коротковолновой радиации практически отсутствует, что упрощает вычисления полусферических потоков.

Предварительные данные показывают, что не возникло каких-либо осложнений для радиометрических измерений в слое облачности из-за загрязнения окон радиометра. Точность измерений эффективного потока в диапазоне 0,4—1,0 мкм составляет около 10 % и несколько выше — в интервале 1,0—1,8 мкм. Погрешности измерений восходящих и нисходящих потоков равны примерно ± 2 %. Совокупное значение погрешности измерений эффективного потока коротковолновой радиации составило около 20 % у поверхности, где разность нисходящего и восходящего потоков максимальна, и 40 % — на больших высотах.

Наблюдения показывают, что на уровнях, где давление превосходит $1,3 \cdot 10^5$ Па, изменения восходящих и нисходящих радиационных потоков с глубиной являются очень плавными и медленными, что контрастирует с данными для больших высот, где наблюдается значительная изменчивость с высотой. Данные для больших высот хорошо коррелируют с данными измерений при помощи нефелометра и спектрометра частиц, характеризующими особенности структуры облаков на различных высотах. Особенно сильное уменьшение радиационных потоков наблюдается в слоях $(1,03 \dots 1,3) \cdot 10^5$ Па, $(0,32 \dots 0,97) \cdot 10^5$ Па и при давлении меньше $0,32 \cdot 10^5$ Па. Поглощение солнечной радиации облаками очень мало — ниже уровня $0,35 \cdot 10^5$ Па.

Специфику вертикальных профилей радиационных потоков можно объяснить на основе учета лишь рэлеевского рассеяния при слабом поглощении. Альбеда поверхности Венеры в видимой области спектра составляет около 15 %. При внеатмосферной инсоляции в видимой области спектра во время зондирования, равной 180 Вт/м^2 , примерно половина солнечной радиации поглощается атмосферой выше уровня 185 гПа. Если учесть, что среднеглобальная инсоляция на 20 % меньше относящейся к зенитному углу

Солнца 67° , то окажется, что радиация, поглощенная поверхностью (в среднем для планеты), составит 12 Вт/м^2 .

Установленный на БСА «Пионер—Венера» радиометр для измерений потоков коротковолновой радиации позволил получить данные о вертикальных профилях нисходящего и восходящего потоков при зенитном угле Солнца, равном $65,7^\circ$. Эти данные (вместе с результатами измерений микроструктуры облаков) были использованы Томаско и др. [208] для обоснования базовой модели облачного покрова (с учетом данных орбитального аппарата о характеристиках верхней части облачности). Таблица 4.9 иллюстрирует совокупность параметров, определяющих базовую модель. Оптическая плотность определена здесь как эквивалентно изотропная $\tau' = (1-q)\tau$, где q — коэффициент асимметрии индикатрисы рассеяния. Значения высот в таблице соответствуют нижним границам различных слоев атмосферы (М — модель микроструктуры облаков).

Под облаками данные о коротковолновом спектре и потоках радиации согласуются с результатами, полученными при помощи АМС «Венера». На основе использования параметров базовой модели облачного покрова рассчитаны значения радиационного нагревания атмосферы за счет поглощения солнечной радиации в области длин волн 0,18—4,6 мкм на различных высотах (12,1—94,4 км) при варьируемых долготе Солнца и широте места. В работе [208] детально воспроизведены результаты вычислений, иллюстрирующие изменчивость поглощенной коротковолновой радиации.

Интегральное радиационное нагревание в слое 50—85 км монотонно возрастает с высотой от 0 до 16 К/сут. Грубые оценки суммарного лучистого притока тепла (с учетом ИК выхолаживания) показали, что в облаках на высоте около 65 км вблизи подсолнечной точки возникает радиационное нагревание до 25 К/сут, которое должно оказывать сильное воздействие на динамику атмосферы.

На АМС «Венера-13» и «Венера-14» были установлены спектрофотометры, которые имеют два спектральных (C1 и C2) и один фотометрический (УФ) каналы [57]. Наличие каналов C1 и C2 позволило измерить спектральное распределение рассеянной солнечной радиации в диапазоне длин волн 0,45—1,2 мкм с разрешением 0,02 мкм, причем канал C2 принимал излучение из верхней полусферы, а каналы C1 и УФ позволили осуществить сканирование по углу в шести направлениях (сверху и снизу). Канал УФ автоматически выключался на высоте 45 км, тогда как данные для каналов C1 и C2 могли быть получены вплоть до поверхности планеты. Начиная с высоты 62 км до посадки зарегистрировано около 6000 спектров и около 100 спектров на поверхности.

Обработка данных привела к значениям отношения смеси водяного пара около $10-20 \text{ млн}^{-1}$ вблизи поверхности и на порядок

Таблица 4.9

Базовая модель облачного покрова Венеры

H км	P, 10 ³ гПа	TK	Оптическая плотность для				Отношение смеси						
			M1	M2	M3	M4	CO ₂	N ₂	H ₂ O	O ₂	SO ₂	HCl	S ₈
98,7	0,0000	174,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,96	0,035	e ⁻⁶	2e ⁻³	0,0	7e ⁻⁷	0,0
90,1	0,0003	165,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,96	0,035	e ⁻⁶	3e ⁻⁴	8e ⁻⁹	7e ⁻⁷	0,0
80,4	0,0040	092,9	0,00	0,00	0,04	0,00	0,96	0,035	e ⁻⁶	5,7e ⁻⁵	1,2e ⁻⁸	7e ⁻⁷	0,0
77,4	0,0078	214,6	0,10	0,00	0,02	0,00	0,96	0,035	e ⁻⁶	2,7e ⁻⁵	1,5e ⁻⁸	7e ⁻⁷	0,0
73,3	0,0179	227,8	0,29	0,00	0,06	0,00	0,96	0,035	e ⁻⁶	1,5e ⁻⁵	1,8e ⁻⁸	7e ⁻⁷	0,0
71,0	0,0280	234,8	0,35	0,00	0,06	0,00	0,96	0,035	e ⁻⁶	e ⁻⁵	2,5e ⁻⁸	7e ⁻⁷	0,0
66,8	0,0622	225,0	1,63	0,00	0,21	0,00	0,96	0,035	e ⁻⁶	4e ⁻⁶	3,3e ⁻⁸	7e ⁻⁷	0,0
64,5	0,0965	246,5	1,80	0,00	0,44	0,00	0,96	0,035	e ⁻⁶	1,4e ⁻⁶	9e ⁻⁸	7e ⁻⁷	0,0
63,4	0,1196	248,2	1,00	0,00	0,56	0,00	0,96	0,035	e ⁻⁶	6,5e ⁻⁷	1,8e ⁻⁷	7e ⁻⁷	0,0
62,4	0,1430	252,5	0,80	0,00	0,71	0,00	0,96	0,035	e ⁻⁶	3e ⁻⁷	2,8e ⁻⁷	7e ⁻⁷	0,0
61,5	0,1663	257,0	0,66	0,00	0,76	0,00	0,96	0,035	e ⁻⁶	1,7e ⁻⁷	3,8e ⁻⁷	7e ⁻⁷	0,0
59,3	0,2426	271,0	1,58	0,00	2,12	0,00	0,96	0,035	5,06e ⁻⁶	6e ⁻⁸	8e ⁻⁷	7e ⁻⁷	0,0
57,7	0,3183	277,4	1,02	0,00	1,53	0,00	0,96	0,035	2,58e ⁻⁵	0,0	2,3e ⁻⁶	7e ⁻⁷	0,0
52,9	0,6657	320,7	0,00	2,11	0,33	2,31	0,06	0,035	1,52e ⁻⁴	0,0	6e ⁻⁶	7e ⁻⁷	0,0
49,8	1,0130	348,6	0,00	2,11	0,33	2,31	0,96	0,035	2,04e ⁻⁴	0,0	9,4e ⁻⁶	7e ⁻⁷	0,0
48,0	1,2770	394,6	0,00	1,44	0,85	2,89	0,96	0,035	1,98e ⁻⁴	0,0	e ⁻⁵	7e ⁻⁷	0,0
24,2	15,440	540,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,96	0,035	8,15e ⁻⁴	0,0	e ⁻⁵	7e ⁻⁷	e ⁻⁸
0,0	90,980	730,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,96	0,035	2,81e ⁻⁴	0,0	e ⁻⁵	7e ⁻⁷	0,0

Глава 4. Облака и радиационный режим в атмосфере Венеры

величины большим — на высоте 40 км. Вертикальный профиль отношения смеси H₂O, характеризуемый значениями 10—20 млн⁻¹ у поверхности и максимумом 200—500 млн⁻¹ в облачном слое (40—60 км), согласуется с результатами других измерений на АМС «Венера-13» и «Венера-14», исключая данные влагомера (около 2000 млн⁻¹). Анализ результатов измерений вертикального профиля УФ излучения на длине волны около 0,37 мкм привел к выводу, что 90 % этого излучения поглощается атмосферой выше уровня 58 км, а оставшаяся часть поглощается слоем 58—48 км (см. табл. 4.10, где $\Delta\tau(1-q)$ — эффективная оптическая плотность слоев, q — коэффициент асимметрии индикатрисы рассеяния, K — объемный коэффициент поглощения, F — поглощенная радиация длин волн $\lambda < 0,42$ мкм). Характеризуемая данными табл. 4.10

Таблица 4.10

Предварительная оптическая модель облачного слоя для УФ области спектра

Слой, км	$\Delta\tau(1-q)$	K км ⁻¹	F Вт/м ²
60—75	2,0 (?)	0,015 (?)	107
58—60	0,2	0,006	3,0
56—58	0,7	0,007	1,1
54—56	0,7	0,0025	0,6
52—54	1,1	0,008	0,8
50—52	1,5	0,007	0,6
48—50	2,8	0,02	2,8

вертикальная структура облаков аналогична наблюдавшейся ранее «Венера-11» и «Венера-12», «Пионер—Венера»).

Согласно [207], поток радиации, поглощенный слоем атмосферы между поверхностью планеты и нижней границей облаков, равен 2—3 Вт/м², тогда как поглощение интегральной радиации достигает 10—15 Вт/м². Отсюда следует, что либо поглощение проявляется в широкой области спектра (как это может быть в случае пыли), либо вблизи одной из групп узкополосного светофильтра (0,590—0,665 мкм) расположена очень сильная полоса поглощения (согласно предварительным данным измерений на СА «Венера-11» и «Венера-12», в нижнем слое атмосферы Венеры имеет место сильное поглощение в области длин волн короче 0,55 мкм).

В работе [207] сделаны расчеты характеристик для глобальных условий вертикальных профилей эффективного потока интегральной коротковолновой радиации в диапазоне 0,3—4,0 мкм и вертикального профиля температуры, которые показали, что если задать эффективную температуру 240 К, соответствующую уходящему тепловому излучению, то температура поверхности планеты окажется превышающей 700 К даже при минимальных значениях

непрозрачности атмосферы и отношении смеси водяного пара в подоблачной атмосфере в пределах $2 \cdot 10^{-4} \dots 2 \cdot 10^{-3}$.

Переход от лучистого к конвективному равновесию происходит в среднем слое облачности (50—57 км). При достаточно низком отношении смеси водяного пара ($2 \cdot 10^{-4}$) влияние окон прозрачности CO_2 определяет формирование в подоблачном слое (от нижней границы облаков до уровня 35 км) вертикального градиента температуры меньше адиабатического с расположением ниже 35 км, где непрозрачность становится достаточно сильной, слоя неустойчивости атмосферы. Таким образом, использование характерных глобальных профилей эффективного потока коротковолновой радиации и реалистических значений отношения смеси водяного пара обеспечивает вполне адекватное воспроизведение парникового эффекта.

На большом спускаемом аппарате «Пионер—Венера» функционировал многоканальный инфракрасный радиометр (МИКР), предназначенный для измерений вертикальных профилей потоков и притока теплового излучения, обнаружения облаков и определения ИК непрозрачности облачного покрова, а также для восстановления содержания водяного пара (Бозе и др. [81]). МИКР позволяет попеременно измерять восходящий и нисходящий потоки интегрального теплового излучения (3—150 мкм, канал А), а для восстановления характеристик облачности и содержания водяного пара служат, соответственно, данные для каналов 8—9 мкм (канал D, окно прозрачности CO_2), а также 6—7 и 7—8 мкм (каналы В, С).

Прибор начал работу во время спуска БСА с высоты 61 км. Хорошие данные для эффективных потоков излучения получены лишь до высоты 45 км (эта высота примерно соответствует началу стадии парашютирования), ниже которой уровень шумов стал слишком высоким. Хотя планируется обработать и данные, относящиеся к высотам меньше 45 км, пока были рассмотрены только результаты для слоя 61—45 км.

Вертикальный профиль разности восходящего и нисходящего потоков (эффективный поток) интегрального теплового излучения (рис. 4.25) характеризуется быстрым убыванием на высотах 61—57 км, относительно малой изменчивостью до уровня 47 км (наиболее четко выражен лишь спад в слое 50—47 км) и значительным возрастанием в интервале 47—45 км. Быстрое убывание на высотах 61—57 км и 50—47 км обусловлено, по-видимому, влиянием ослабления длинноволновой радиации частицами облаков. Возрастание эффективного потока в интервале 47—45 км происходит таким образом, как если бы относительно «холодное» излучение плотной нижней зоны облачного покрова вычиталось из возрастающего с глубиной (по мере роста температуры) восходящего потока излучения.

Данные для каналов D и С показывают резкий спад эффективного потока (примерно в три раза) на уровне 50,5 км, соответствующем верхней границе нижней зоны облаков, с последующим

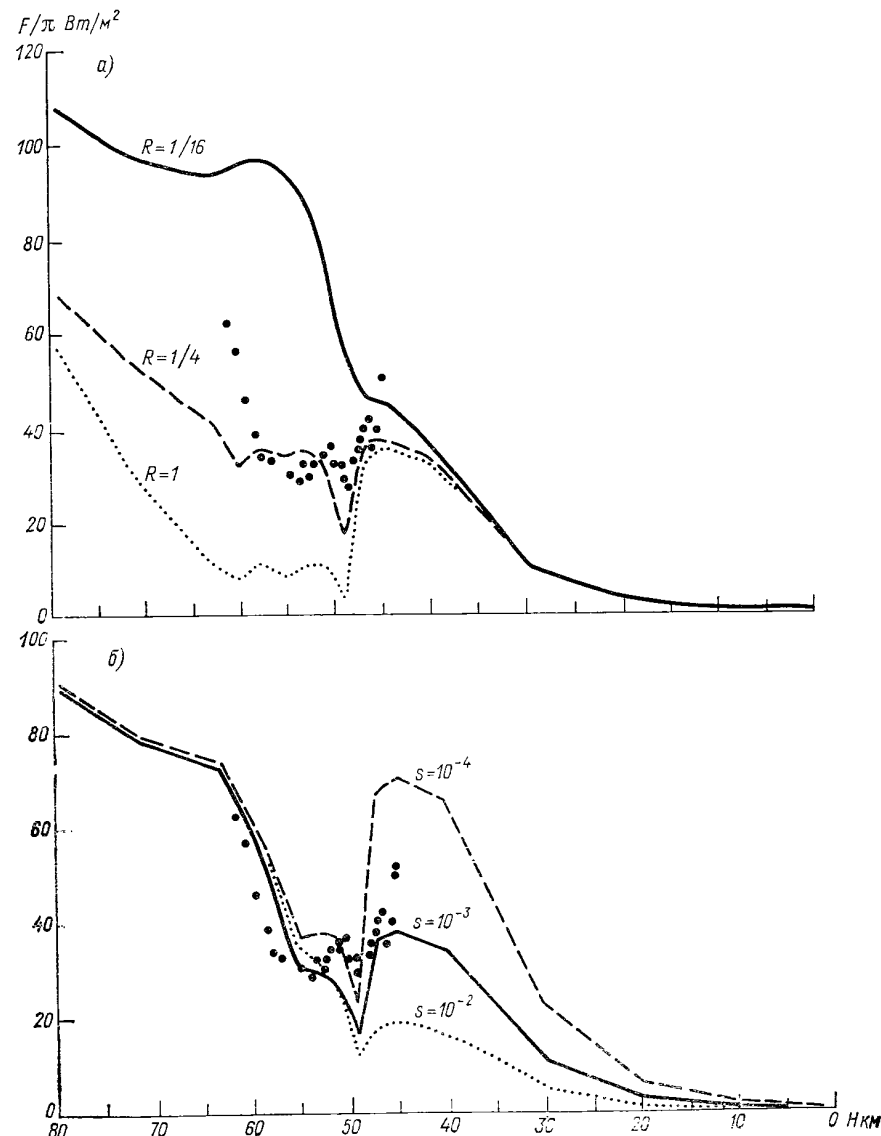


Рис. 4.25. Зависимость значений интегрального эффективного потока радиации F (канал А) от высоты по данным расчетов (кривые) и наблюдений (точки).

а) расчеты выполнены при различных значениях $R = \sigma_{\text{ИК}} / \sigma_{\text{внд}}$; б) расчеты выполнены при различных значениях отношения смеси водяного пара $s_{\text{H}_2\text{O}}$ под основным облачным покровом, $R = 1/16$ для верхнего слоя облаков (выше 57 км) и $R = 1/4$ для среднего и нижнего слоев.

постепенным возрастанием до прежнего значения. Для канала В наблюдается убывание эффективного потока примерно на 30 % вблизи уровня 52,25 км, т.е. над нижней зоной облаков, а вблизи уровня ее верхней границы имеет место резкое возрастание с последующим убыванием на 50 % внутри облака. Сильное увеличение эффективного потока для канала В с глубиной начинается на высоте 48 км, перед достижением «нормальной» нижней границы облачного покрова (причины этого увеличения пока неясны).

Численное моделирование условий наблюдений с использованием данных измерений структурных параметров атмосферы и характеристик облачного покрова при помощи аппаратуры, установленной на БСА, при различных вертикальных профилях ИК коэффициента экстинкции $\sigma_{ик}$ и параметра $R = \sigma_{ик} / \sigma_{вид}$ ($\sigma_{вид}$ — коэффициент экстинкции в видимой области спектра), а также различных профилях отношения смеси водяного пара показало, что наилучшее согласие для средней зоны облачного покрова (57—50 км) имеет место при $R = 1/4$. Однако наблюдаемое возрастание эффективного потока с высотой выше 57 км (верхняя зона облачности) значительно сильнее расчетного. Это свидетельствует о том, что в верхней зоне $R = 1/4$ ввиду отсутствия крупных частиц. Более значительны и наблюдаемые изменения эффективного потока в нижней зоне облачного слоя (50—47 км).

Анализ чувствительности вертикального профиля эффективного потока к отношению смеси водяного пара привел к выводу, что наилучшее согласие на высотах меньше 47 км наблюдается при отношении смеси около 10^{-3} (это значение согласуется с данными прямых измерений концентрации водяного пара в подоблачном слое атмосферы). Осредненная по ИК спектру оптическая плотность облачного слоя составляет около 7, т.е. в 5 раз меньше оптической плотности облаков в видимой области спектра, равной 35. Полученное содержание водяного пара под облаками сравнимо с тем, которое необходимо для «перекрытия» окон прозрачности ИК спектра (это может служить объяснением наблюдаемого парникового эффекта атмосферы). Несомненно, однако, что значительный вклад в парниковый эффект вносят и частицы облаков.

Установленные на САС, САД и САН балансомеры успешно функционировали от момента раскрытия парашюта до высоты 12,5 км (температура около 634 К), когда, по не установленным еще причинам, все балансомеры и их датчики температуры вышли из строя [190]. Снабженные окнами из алмаза балансомеры позволяют измерять полный радиационный баланс (РБ) и, следовательно, определять лучистый приток тепла (ЛПТ) к отдельным слоям атмосферы. На высоте более 27 км данные о РБ получены с интервалом 4 с, а ниже — с интервалом 16 с. Вертикальные профили РБ характеризуются небольшими флуктуациями, которые можно объяснить нарушениями горизонтальности приемных поверхностей. Погрешность измерений, как правило, не превышает 5 Вт/м². Хотя для контроля температуры корпуса балансомеров были установлены специальные датчики температуры, оказалось,

что разность температур балансомеров и атмосферы в диапазоне высот 50—12 км не превосходила 5 К.

Результаты измерений показывают, что профиль РБ характеризуется присутствием перемежающихся слоев радиационного выхолаживания и нагревания, причем сходство профилей позволяет выделить планетарные особенности их стратификации. Основная толща атмосферы на высотах до 50 км испытывает радиационное выхолаживание на широте 60° с. ш. (ночные измерения) и нагревание на широте 30° ю. ш. (дневные измерения). Эти меридиональные различия ЛПТ должны быть важным фактором энергетики общей циркуляции атмосферы, и их следует учитывать в моделях общей циркуляции. Детали вертикальной структуры профилей РБ связаны с неоднородностью атмосферы, проявляющейся в наличии трех слоев: 1) облачного покрова, граница которого снизу определяется показаниями нефелометра; 2) среднего слоя между упомянутой границей и высотами 35—37 км, в котором нефелометр не зарегистрировал рассеяния; 3) нижнего слоя (ниже 35 км).

Вертикальная структура профиля РБ в пределах облачного покрова обусловлена главным образом его трехслойностью, порождающей перемежающиеся слои радиационного выхолаживания и нагревания. Необычная особенность профиля РБ в облаках отмечена вблизи уровня 60 км на широте 60° с. ш. Хотя сигнал нефелометра здесь слабее, чем на меньших высотах, профиль РБ указывает на локальный источник сильной непрозрачности атмосферы, что, по-видимому, связано со спецификой атмосферной циркуляции на этом уровне, обнаруживаемой при анализе УФ и ИК изображений Венеры.

Попеременные слои положительного и отрицательного ЛПТ характерны также для устойчивого подоблачного слоя, где вертикальный градиент температуры меньше адиабатического. Радиационное нагревание прослеживается в слоях 36—40 и 45—47 км.

Противоречащие расчетам результаты дали измерения в нижнем слое. Так, например, данные САС свидетельствуют о значительно более слабом выхолаживании, чем ожидалось. Наблюдаемое выхолаживание уменьшается с высотой, тогда как расчеты определяют рост выхолаживания. Измерения на САС дают значение РБ на высоте 13 км, равное почти 60 Вт/м², что в несколько раз превосходит расчетное значение даже в случае модели с очень низкой концентрацией H₂O (0,01 %). Из наблюдений вытекает, таким образом, что непрозрачность нижних слоев атмосферы значительно меньше расчетной. Сходные результаты получились и по данным САН, за исключением высот меньше 27 км, где наблюдается слой радиационного нагревания (достоверность данных для этого слоя требует, однако, проверки). Профиль РБ в нижнем слое по данным САД характеризуется наличием нагревания ниже уровня 27 км, которое, по-видимому, обусловлено поглощением солнечной радиации.

Если оценить коротковолновый баланс в подоблачном слое по разности показаний балансомеров САД и САН (или САС), то он оказывается примерно в 4 раза большим, чем по данным радиометра солнечного потока, установленного на большом спускаемом аппарате. Вероятно, это обусловлено различиями облачности в местах спуска САД и БСА. Следует думать, что три слоя атмосферы, распознаваемые по особенностям вертикальных профилей РБ, характеризуются связанными с этим особенностями общей циркуляции атмосферы.

Датчики радиационных потоков, установленные на большом спускаемом аппарате «Пионер—Венера» и трех малых СА, позволили впервые получить информацию о радиационном балансе и его составляющих. Инфракрасный радиометр БСА располагался внутри герметизированного корпуса АМС, и наблюдения велись через иллюминатор, тогда как датчики РБ малых СА находились снаружи. Осуществленный Реверкомбом и др. [168] анализ полученных результатов показал, что данные о РБ под облачным покровом имеют значительные погрешности. Показания ИК радиометра оказались завышенными на высотах меньше 45 км (по-видимому, вследствие рассогласования поля зрения радиометра и иллюминатора или неодинаковости чувствительности прибора к нисходящей и восходящей радиации).

Реверкомб и др. [168] проанализировали исправленные значения эффективного потока теплового излучения на различных высотах в атмосфере Венеры, полученные при помощи радиометров, установленных на СА «Пионер—Венера» (данные двух из трех радиометров, использованных на трех малых СА, имели большие погрешности ниже облачного покрова, а погрешности датчиков большого СА возрастали по мере погружения в облако и очень сильно возросли у поверхности Венеры). Анализ исправленных значений эффективного излучения (ЭИ), относящихся к 60° с. ш., 31° ю. ш., 27° ю. ш. и 4° с. ш., позволил сделать следующие выводы: 1) данные большого СА об ЭИ согласуются с результатами измерений счетной концентрации частиц крупнодисперсной моды 3 облаков, но данные ИК наблюдений в целом точнее описываются, если задать значительно меньший вклад моды 3 в формирование непрозрачности облаков; 2) все рассмотренные данные (на всех широтах) указывают на существование пока еще не идентифицированного источника ИК непрозрачности верхнего слоя облачности; 3) под облаками наблюдается возрастание ЭИ на фиксированной высоте с широтой, свидетельствуя о том, что в высоких широтах имеет место более сильное ИК выхолаживание.

Полученные путем сравнения наблюдаемого и вычисленного ЭИ значения отношения смеси водяного пара составляют: $(2...5) \cdot 10^{-5}$ (вблизи широты 60°); $(2...5) \cdot 10^{-4}$ (30°) и больше $5 \cdot 10^{-4}$ (на экваторе), т.е. нижняя атмосфера Венеры является более сухой в высоких широтах. Этот факт имеет важное значение для понимания закономерностей общей циркуляции атмосферы на Венере: связанное с ним наличие широтного градиента радиацион-

ного выхолаживания под облаками должно усиливать воздействие солнечно обусловленного нагрева на формирование ОЦА. Подобный градиент должен существенно влиять на контраст температуры экватор—полюс и интенсивность ОЦА. Усиление ИК выхолаживания под облаками в высоких широтах должно благоприятствовать нисходящим движениям, что согласуется с ОЦА, включающей полярные вихри в обоих полушариях. В работах К. Я. Кондратьева и Н. И. Москаленко [35—42, 127, 130] осуществлено построение замкнутой оптической модели облачного покрова Венеры.

Данные наблюдений показывают, что определяющее влияние на поглощение излучения в атмосфере Венеры оказывают углекислый газ и водяной пар, хотя существен вклад CO , SO_2 , HCl , HF в окна прозрачности CO_2 . В ближней ультрафиолетовой и в видимой областях спектра возможно поглощение излучения молекулами S_n ($n=1, 2...8$) серы и NO_2 . Не исключено в атмосфере Венеры и присутствие углеводородных соединений (CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6), N_2O , сильно поглощающих излучение в области спектра $\lambda > 1,6$ мкм.

С целью получения надежных данных о поглощающих свойствах атмосферы Венеры Москаленко и его сотрудниками (см. [32]) были выполнены детальные исследования спектров поглощения перечисленных выше газовых компонентов в видимой и ИК областях при температурах 200—800 К и подготовлены атласы параметров спектральных линий поглощения. Данные этих измерений позволили получить сведения о спектральных коэффициентах индуцированного давлением поглощения CO_2 и форме крыльев спектральных линий CO_2 , спектральные коэффициенты поглощения и их зависимости от температуры. В работе [36] рассматриваются некоторые результаты детальных исследований поглощения излучения газовыми компонентами атмосферы Венеры. Результаты работы объединяют данные лабораторных исследований и численного моделирования переноса излучения в венерианской атмосфере по параметрам тонкой структуры спектров поглощения. Расчеты охватывают всю область спектра от дальнего ультрафиолетового до субмикронного диапазона длин волн.

При исследованиях поглощающих свойств венерианской атмосферы учитывалось влияние температуры на функцию спектрального пропускания, индуцированное давлением поглощение (ИДП) CO_2 , N_2 , O_2 и континуальное поглощение крыльями спектральных линий по данным измерений или точного теоретического расчета.

Анализ рассчитанных спектров поглощения углекислой венерианской атмосферы на уровне с давлением $P=10^5$ Па по горизонтальным и наклонным трассам, показывает, что уже при этом давлении в ИК области ($\lambda > 1,2$ мкм) углекислая атмосфера довольно непрозрачна. В то же время при $1,2 \text{ мкм} < \lambda < 1,8 \text{ мкм}$ даже при большой оптической плотности CO_2 , характерной для атмо-

сферы Венеры, наблюдается много микроокон, а в области $\lambda < 1,2$ мкм атмосферный CO_2 довольно прозрачен, что обеспечивает доступ излучения Солнца к глубинным слоям атмосферы и к поверхности планеты. В ИК области наиболее прозрачны диапазоны спектра поглощения CO_2 в окрестности длин волн 2, 3, 6 и 25 мкм.

Водяной пар обладает наиболее сильными полосами в областях 18 мкм и 6,3 мкм. Полосы поглощения 2,7 и 3,2 мкм перекрываются полосами CO_2 , и здесь роль водяного пара не столь велика. В связи со слабостью полос поглощения CO_2 водяной пар играет значительную роль в поглощении излучения и в области спектра $\lambda < 1,2$ мкм — полосы 0,74; 0,83; 0,94; 1,15 мкм. Этому способствует и некоторый рост интенсивностей этих полос с увеличением температуры. Значимы также вклады полос 1,37 и 1,87 мкм в лучистые притоки коротковолновой радиации венерианской атмосферы. Как для CO_2 , так и для водяного пара спектральный диапазон в окрестности $\lambda = 2,3$ мкм довольно прозрачен. Поэтому в этом окне важен учет поглощения излучения малыми компонентами венерианской атмосферы: CO , HCl , HF . Поглощение излучения в этой области может быть вызвано также CH_4 и другими углеводородными соединениями, а также N_2O .

Практически все полосы поглощения NO_2 в ИК области перекрываются полосами поглощения H_2O и CO_2 , поэтому NO_2 не может играть заметной роли в парниковом эффекте, создаваемом венерианской атмосферой. В связи с малыми концентрациями O_2 и сильным поглощением излучения полосой 6,3 мкм паров H_2O ИДП полосы 5,5 мкм не играет заметной роли в парниковом эффекте. Более важен учет полосы 4,3 мкм ИДП N_2 и полос 1,26 и 0,76 мкм O_2 .

Если поглощение излучения венерианской атмосферой в области 0,2—0,6 мкм можно объяснить присутствием SO_2 , S_n и NO_2 , то наблюдаемое фоновое поглощение в спектрах рассеянного солнечного излучения при $\lambda > 0,6$ мкм и поглощение лучистых потоков нисходящего и восходящего излучения в подоблачной атмосфере, возможно, обусловлено мелкодисперсной фракцией пылевого аэрозоля, содержащего значительный процент Fe_2O_3 . Полученные в работе [36] оценки показывают, что для подоблачной атмосферы и $H > 10$ км в области 0,6—1,0 мкм фоновое поглощение приводит к уменьшению альбедо однократного рассеяния $\bar{\omega}$ от значения 0,997 при $\lambda = 0,6$ мкм до значения 0,992 при $\lambda = 1,0$ мкм. Более вероятно, что мелкодисперсный аэрозоль от поверхности планеты за счет диффузии переносится до высот 35—45 км и представляет собой разреженный и в среднем однородный слой. По-видимому, вызвано SO_2 , S_n и мелкодисперсной пылевой фракцией, сильно поглощающей, но слабо рассеивающей излучение в области спектра $\lambda > 0,6$ мкм.

Известно, что лучистый теплообмен в атмосфере планеты определяется ее оптическими свойствами и структурными характеристиками. В связи с этим актуален анализ данных, полученных

с помощью АМС, для проверки их внутренней непротиворечивости по структурным параметрам, химическому составу, оптическим свойствам атмосферы и лучистому теплообмену. Сведения о потоках и притоках коротковолновой и длинноволновой радиации в атмосфере Венеры, полученные в [24, 89], дают возможность построить модели структуры атмосферы и ее химического состава, которые не противоречат структуре радиационного баланса. Если концентрация основных оптически активных компонентов атмосферы известна, то по вертикальному профилю эффективного потока $F(H)$ можно определить концентрацию другого оптически активного компонента, оказывающего на величину $F(H)$ существенное влияние.

В настоящее время концентрация CO_2 , вертикальный профиль температуры венерианской атмосферы и структура ее облачности определены достаточно надежно, в то время как данные об относительной концентрации водяного пара $\text{C}_{\text{H}_2\text{O}}$ весьма противоречивы и по различным оценкам лежат в области значений от 10^{-5} до 10^{-2} . Для уточнения вертикального профиля концентрации водяного пара в работе [41] была решена обратная задача восстановления профиля $\text{C}_{\text{H}_2\text{O}}(H)$ по профилю эффективного потока теплового излучения. Решение задачи получено при условии, что эффективный поток теплового излучения $F(H)$ не превосходит притока солнечного излучения к планете. Была использована модель многокомпонентного облачного покрова, представленная на рис. 4.26. Оптические характеристики облачного покрова и дымки вычислены для микроструктур

$$N_i(r) = A_i r^{a_i} \exp(-b_i r^{c_i})_i.$$

Здесь $N_i(r)$ — счетная концентрация частиц; A_i , a_i , b_i , c_i ($c_i = 0,5$) — параметры i -й фракции (значения a_i , b_i представлены в табл. 4.11). Коэффициенты поглощения σ_a^i , $\lambda(H)$, рассеяния σ_s^i , $\lambda(H)$ и индикатрисы рассеяния $f_\lambda(\theta, H)$ вычислены по формулам Ми с учетом суперпозиции взвешенных по оптической плотности значений этих величин по всем фракциям дисперсной фазы (см. табл. 4.11). Профиль $\text{C}_{\text{H}_2\text{O}}(H)$ определен путем минимизации функционала

$$\sum_i \{F_n(H) - F_p[C_{\text{H}_2\text{O}}(H)]\}_i = \min,$$

где $F_n(H)$, $F_p(H)$ — измеренный и рассчитанный эффективные потоки излучения.

В подоблачной атмосфере концентрация H_2O была получена по данным [89] о спектрах рассеянного излучения в полосе 0,93 мкм. Вклад поглощения CO_2 , H_2O , CO , HCl , HF вычислялся

Таблица 4.11

Модель многокомпонентного облачного покрова

Фракция	Химический состав и фазовое состояние	Параметры микроструктуры	
		<i>a</i>	<i>b</i>
1	75 %-ный раствор H_2SO_4	0,2	6
2	То же	2	6
3	„	3	4
4	Концентрированная H_2SO_4	0,2	6
5	То же	5	12
6	„	2	9
7	Твердая сера	1	1
8	„	3	4
9	Жидкая сера	0	6
10	Жидкая сера + H_2SO_4	1	1
11	Жидкая сера	2	9
12	Фоновый аэрозоль	1	50

методом прямого расчета. Для подоблачной атмосферы коэффициенты поглощения водяного пара, O_2 и SO_2 измерены в лабораторных условиях. В табл. 4.12 приведен полученный нами вертикальный профиль $C_{H_2O}(H)$, который удовлетворительно согласуется с результатами [54]. Концентрация O_2 определена по по-

Таблица 4.12

Вертикальный профиль концентрации H_2O

<i>H</i> км	$C_{H_2O} \cdot 10^5$	<i>H</i> км	$C_{H_2O} \cdot 10^5$	<i>H</i> км	$C_{H_2O} \cdot 10^5$
0	3	25	4,5	50	14
5	3,2	30	4,5	55	10
10	3,5	35	5	60	6
15	4	40	6	65	2
20	4,5	45	8	70	0,5
				70	0,2

лосе поглощения 0,76 мкм в спектре рассеянного излучения и вблизи поверхности планеты составила $(70 \pm 20) \cdot 10^{-6}$. В подоблачной атмосфере концентрация CO_2 слабо зависит от высоты.

На рис. 4.27 представлены расчетные профили эффективных потоков коротковолновой и длинноволновой радиации, сопоставленные с данными измерений АМС «Пионер—Венера». Модель облачности соответствовала рис. 4.26 и табл. 4.11. Была принята модель атмосферы, содержащей 96 % CO_2 ; $1 \cdot 10^{-2}$ % SO_2 ; 3,8 % N_2 ; $7 \cdot 10^{-3}$ % O_2 ; $3 \cdot 10^{-5}$ % CO ; $2 \cdot 10^{-7}$ % HCl ; $3 \cdot 10^{-9}$ % HF . Вертикальный профиль водяного пара взят по данным табл. 4.12. Концентрация серы S_n ($n=1,2, \dots, 8$) принималась равной $3 \cdot 10^{-8}$. Вертикальный

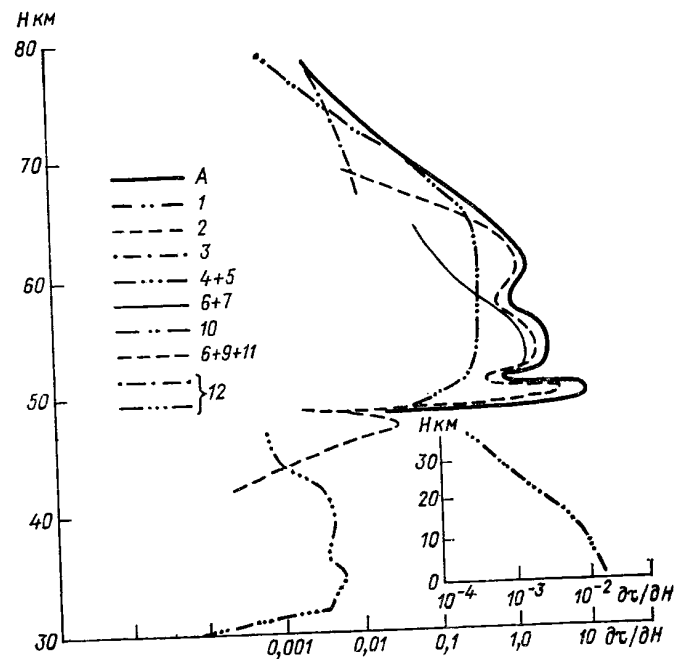


Рис. 4.26. Вертикальная структура многокомпонентной оптической модели дисперсной фазы атмосферы Венеры.

А — вертикальный профиль оптической плотности; 1—12 — профили микроструктуры и химического состава дисперсной фазы согласно табл. 4.11.

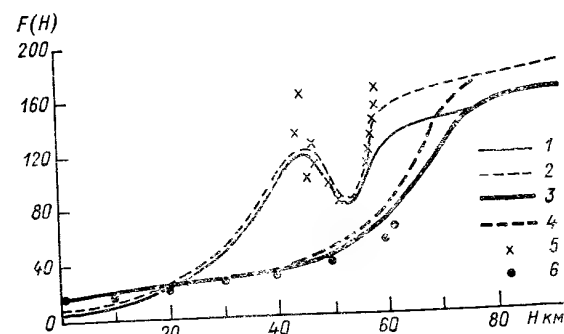


Рис. 4.27. Вертикальные профили эффективного потока $F(H)$ длинноволновой (1, 2) и коротковолновой (3, 4) радиации, вычисленные для модели облачности с альбедо $A=0,77$ (кривые 1, 3) и $A'=0,74$ (кривые 2, 4); 5, 6 — данные измерений АМС «Пионер—Венера».

профиль фонового пылевого аэрозоля соответствовал значению его оптической плотности $d\tau/dH = 0,015 \text{ км}^{-1}$ у поверхности. Вертикальный профиль концентрации частиц серы выбран так, чтобы согласовать измеренный и вычисленный эффективные потоки коротковолновой радиации. Необходимые для расчетов коэффициенты поглощения SO_2 , имеющие четко выраженную спектральную структуру, были измерены в лаборатории. Расчеты нисходящего и восходящего потоков коротковолновой радиации выполнены по методу сложения слоев.

Предложенная модель структуры облачности и химического состава атмосферы удовлетворительно описывает данные измерений эффективных потоков коротковолновой и длинноволновой радиации. Отметим некоторые специфические черты радиационного баланса венерианской атмосферы. Обращают на себя внимание значительные притоки коротковолновой радиации на высотах 65—75 км, которые могут приводить к усилению вертикальной циркуляции атмосферы Венеры вблизи верхней границы облачности и выносу аэрозоля в более высокие слои атмосферы. Однако наблюдаемые минимумы яркостной температуры Венеры в дневное время скорее обусловлены повышением концентрации фонового аэрозоля из частиц H_2SO_4 . Их генерация способствует повышенной концентрации ионов в надоблачной атмосфере в дневное время, а также диффузия в верхние слои атмосферы мелкодисперсной серы, образовавшейся в процессе фотодиссоциации.

Поскольку образование кластеров H_2SO_4 на ионах и S_n происходит очень быстро, а время их жизни составляет несколько часов, фоновый аэрозольный слой очень чувствителен к условиям освещенности и после заката Солнца быстро разрушается. В связи с этим на ночной стороне фоновый надоблачный аэрозольный слой может отсутствовать, а структура верхних слоев облачности и надоблачной дымки будет зависеть от условий освещенности. Эффективный поток солнечного излучения, достигающий поверхности планеты, составляет 17—19 Вт/м², в то время как поглощенный атмосферой поток солнечного излучения равен 140—150 Вт/м². Малый эффективный поток теплового излучения у поверхности планеты (7—10 Вт/м²) связан с сильной непрозрачностью венерианской атмосферы в области спектра $\lambda > 1,2 \text{ мкм}$. Высокая оптическая активность газовой и дисперсной фаз венерианской облачности вызывает сильный парниковый эффект и обуславливает высокую температуру поверхности планеты и нижних слоев ее атмосферы.

Наличие ветров в нижних слоях атмосферы Венеры и высокой температуры поверхности свидетельствуют о возможности загрязнения атмосферы пылью, поднятой с поверхности [112, 131]. Сделанные Хессом [112] расчеты динамической скорости, необходимой для подъема в воздух пыли, находящейся на поверхности Венеры, привели к выводу, что наиболее вероятный радиус частиц составляет 16—17 мкм, поскольку при таких размерах частиц критическая скорость имеет резкий минимум — 1,3 см/с. Эта скорость

значительно меньше, чем соответствующие значения для Земли и Марса. По-видимому, очень легкий ветер способен поднимать пыль с поверхности Венеры. Пыль указанных размеров не может оставаться взвешенной вблизи поверхности, поскольку гравитационное оседание более эффективно, чем турбулентная диффузия. Ситуация изменяется, однако, на высотах 1—2 км, где диффузия способна поддерживать пыль во взвешенном состоянии продолжительное время, так как коэффициент турбулентного перемешивания может достигать здесь 10^6 — $10^8 \text{ см}^2/\text{с}$. Предполагается, что образование пылевых частиц радиусом 16 мкм обусловлено размельчением крупных частиц, которые могут быть подняты с поверхности более сильным ветром (несколько метров в секунду).

Аналогичные результаты дали выполненные Саганом (см. [131]) расчеты пороговой динамической скорости, обеспечивающей передвижение частиц пыли на поверхности Венеры, которые показали, что эта скорость составляет у поверхности 1—2 см/с, а над пограничным подслоем должна превосходить 0,3 м/с. Теоретические расчеты и данные «Венеры-8» о ветре побуждают предположить, что подъем пыли в районе посадки «Венеры-8» (10° ю. ш.) невозможен, но осуществим в более высоких широтах.

Пыль, поднятая на высоту нескольких десятков километров, должна распространяться над всей планетой и может оказать существенное влияние на поглощение солнечной радиации, оптические свойства облаков и общую циркуляцию атмосферы. Данные измерений освещенности на «Венере-10» свидетельствуют, однако, о наличии чистой газовой нижней части атмосферы на широте 10° ю. ш., несмотря на упомянутую возможность глобального запыления атмосферы. Следует поэтому предположить, что распространение пыли может быть ограничено недостаточно интенсивной вертикальной турбулентной диффузией или тепловым спеканием частиц на поверхности планеты.

Отсутствие до сих пор вполне надежных сведений о природе венерианских облаков выдвигает необходимость дальнейших исследований: 1) пространственно-временных вариаций содержания H_2O , HCl и HF и их связи с полем температуры, что можно осуществить путем координированных наблюдений на нескольких обсерваториях с использованием спектральной аппаратуры высокого разрешения; 2) физической химии системы H_2O — H_2SO_4 — HCl при условиях, соответствующих верхней границе облачного покрова, путем лабораторных экспериментов; 3) общей циркуляции атмосферы на основе прямых измерений ветра; 4) природы контрастов яркости в ультрафиолетовой области спектра; 5) вертикальной структуры характеристик облачности (концентрации различных компонентов, распределения частиц по размерам). Ввиду изменчивости свойств атмосферы Венеры, необходимо проявить большую осторожность в вопросе о репрезентативности единичных данных прямых измерений.

Глава 5

Динамика атмосферы Венеры

Слежение за динамикой неоднородностей облачного покрова Венеры, данные измерений при помощи СА «Венера» позволили выявить сложную картину атмосферных движений [34, 131]. Так, например, Суоми и Лимэй [189] выполнили анализ всех телевизионных изображений Венеры за время пролета АМС «Маринер-10» который привел к убедительному доказательству существования глобального циркумполярного вихря в стратосфере Венеры. Этот анализ осуществлен с использованием 22 изображений за 6,85 сут, которые были стандартизованы с целью обеспечения эквивалентности условий солнечного освещения (для устранения варьирующих эффектов затенения) и представлены в полярной стереографической проекции (для удобства анализа структуры облачного покрова в полярных районах). Отдельные асинхронные совокупности изображений за несколько суток использованы для построения полушарных мозаик с учетом зональных перемещений различных элементов облачного покрова.

При рассмотрении полушарных мозаик в полярной зоне южного полушария отчетливо выявляется наличие сплошного облачного покрова, яркость которого примерно на 50 % превосходит яркость облаков в других районах южного полушария за рассматриваемые 7 сут. Зона сплошной облачности имеет форму эллипса, что побуждает предположить существование в высоких широтах волнообразных движений с волновым числом около 2. Прослеживание перемещения отдельных структурных особенностей облачного покрова показывает, что на широтах до 60—65° ю. ш. имеет место зональное (вдоль кругов широты) движение всей стратосферы. В полосе низких и умеренных широт наблюдается обнаруженное ранее дифференциальное вращение, которое определяется наличием меридиональной зависимости зонального переноса УФ неоднородностей облачного покрова. Полушарные мозаики наглядно свидетельствуют о существовании глобального циркумполярного вихря в стратосфере Венеры, отображаемого системой спиралеобразных облачных полос, сходящихся к полярной зоне сплошной облачности, что внешне является точным аналогом спиралеобразных систем облачности земных тропических циклонов. Хотя информация, относящаяся к северному полушарию Венеры, гораздо более скудна, имеются основания считать, что там наблюдается аналогичная макромасштабная структура облачного покрова.

Вток воздуха в верхнюю часть венерианского циркумполярного вихря соответствует входу воздуха в зону земного тропического урагана вблизи подстилающей поверхности. Если такая аналогия правильна, следует предполагать существование оттока воздуха

в нижерасположенных слоях атмосферы в зоне вихря, возможно, вблизи поверхности планеты. Вероятно, таким образом, что на Венере существует циркуляция типа ячейки Гадлея (подъем воздуха над экватором и опускание в высоких широтах), охватывающая целое полушарие, причем источником энергии служит не выделение скрытой теплоты конденсации (как в земном тропическом циклоне), а поглощение солнечной радиации верхним пограничным слоем типа предложенного Гуди и Робинсоном [105—108], но эта циркуляция осуществляется между низкими широтами и полюсом, а не между дневной и ночной сторонами планеты, как это первоначально предполагали Гуди и Робинсон.

Все это означает, что циркумполярный вихрь на Венере поддерживается, по-видимому, за счет превращения поглощенной солнечной радиации в скрытое тепло. Остаются, однако, загадочными причины существования яркого полярного облачного покрова, а также факторы долговременной неустойчивости, которые определяют наблюдаемую изменчивость (появление и исчезновение) полярного облака. Очень важно проследить за динамикой крупномасштабных особенностей структуры венерианского облачного покрова на протяжении длительного промежутка времени. Именно такой была одна из целей наблюдений при помощи АМС «Пионер—Венера».

Результаты наблюдений при помощи СА «Венера» позволили впервые получить представление о ветровом режиме в нижних слоях атмосферы Венеры [1, 4—7, 9, 17, 19, 21, 25, 26, 48, 61]. По данным «Венеры-4», скорость ветра достигает 40—50 м/с. Однако ниже 40 км ветер не был зарегистрирован. По доплеровским данным АМС «Венера-5, -6» обнаружено очень медленное изменение скорости ветра в течение всего спуска без заметной турбулентности (скорость ветра не превышает 8—15 м/с). При обработке данных «Венеры-7» получены скорости 5—14 м/с на высотах 38—53 км. Ниже 38 км скорость ветра мала. В слое от поверхности до уровня 3,5 км скорость ветра возрастает в среднем от нуля до 2,5 м/с (максимальное значение составляет 5 м/с). Средняя вертикальная скорость на высоте 3,5 км равна 0,5 м/с при максимальном значении 1 м/с.

По данным «Венеры-8», скорость ветра возрастает от 0—0,5 м/с у поверхности планеты до 100—140 м/с на высотах более 48 км, но не изменяет направления. В слое 20—40 км ветер практически постоянен и составляет 30—36 м/с. Для нижней части тропосферы (0—10 км) характерен слабый ветер. На высотах 12—18 км и вблизи 48 км расположены зоны сильных вертикальных градиентов скорости ветра. Обращает на себя внимание тот факт, что по данным «Венеры-8» в слое 20—40 км наблюдаются гораздо более сильные ветры, чем по данным, полученным ранее. Согласно данным «Венеры-7», скорость ветра в упомянутом слое не превышает 5 м/с, а наблюдения «Венеры-8», относящиеся к почти меридио-

нальному направлению, дали горизонтальный компонент, близкий к нулю, но с ошибкой около 12 м/с. По результатам АМС «Венера-5, -6» данные о горизонтальной составляющей ветра получить не удалось, так как эти АМС совершили посадку очень

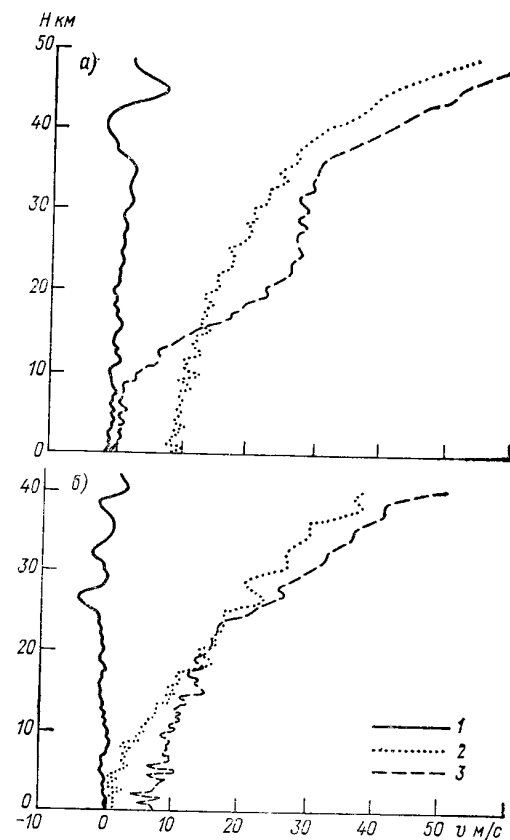


Рис. 5.1. Вертикальный профиль ветра по данным доплеровских дифференциальных интерферометрических измерений с ОА (а) и БСА (б) «Пионер—Венера».

1 — южный компонент ветра, 2 — нисходящие вертикальные движения, 3 — восточный компонент ветра.

близко от подземных точек. Основываясь на том, что у поверхности Венеры скорость ветра мала, М. Я. Маров и др. [50] высказали предположение о малой концентрации пыли в нижних слоях атмосферы и слабой ветровой эрозии.

На рис. 5.1 воспроизведены результаты определения скорости ветра по данным ОА и БСА «Пионер—Венера» [88, 89, 117]. Выше 40 км, где существует максимальный градиент давления, условие циклострофического баланса приводит к скорости зональ-

ного (восточного) ветра, возрастающей с высотой в слое 40—60 км от 60 до 130 м/с. Данные интерферометрических измерений на ночной стороне свидетельствуют о росте скорости восточного ветра от 2—3 м/с у поверхности до 50 м/с на высоте 40 км без заметного изменения направления. Меридиональный компонент превышает 4 м/с выше 25 км. На дневной стороне (25° ю. ш.) восточный ветер возрастал от 1—2 м/с у поверхности до 60 м/с на высоте 50 км, причем наблюдались повороты ветра в слое 10—20 км и выше 25 км. Сильная изменчивость ветра выше 35 км свидетельствует о наличии крупномасштабной турбулентности. В облаках (49—55 км) южный компонент скорости ветра быстро возрастал от 2 до 25 м/с, тогда как восточный компонент увеличивался более чем до 200 м/с, что указывает на реальность сильных ветров, восстанавливаемых по движению верхней части облаков. При определении ветра по полю температуры выявлена меридиональная циркуляция от экватора к полюсу ниже 90 км с обратной ветвью циркуляции выше этого уровня. Новый анализ данных не подтверждает существования сильной турбулентности на высотах 60 и 45 км.

Используя данные «Венеры-9 и -10», Г. С. Голицын [18] получил оценки турбулентного режима атмосферы вблизи поверхности. По данным прямых измерений скорости ветра при помощи чашечного анемометра, установленного на спускаемом аппарате АМС «Венера-9», средняя скорость ветра у поверхности планеты составляет $\bar{u}=40$ см/с при среднеквадратическом разбросе $\sigma_u=15$ см/с; для «Венеры-10» соответственно $\bar{u}=90$ см/с, $\sigma_u=15$ см/с (если исключить погрешности измерений, реальные дисперсии будут, по-видимому, меньше).

Измерения в лабораторных условиях на Земле и в земной атмосфере показали, что $\sigma_u/u_* \cong 2,3$ (u_* — динамическая скорость). Если принять это значение, то для точек посадки «Венеры-9» и «Венеры-10» получается соответственно $u \cong 4$ и $u \cong 7$ см/с. Использование этих значений приводит к значениям диссипации на уровне измерений скорости ветра (1,3 м), равным 1,2 и 4,3 см²/с³. Зная $\bar{u}$ и предполагая логарифмичность вертикального профиля скорости, можно оценить значения шероховатости z_0 , равные 2,4 и 0,8 см соответственно для «Венеры-9» и «Венеры-10».

Если исходить из того, что турбулентный поток тепла не превосходит потока рассеянной солнечной радиации на уровне поверхности Венеры (100 Вт/м²), то оценка кинематического потока тепла будет следующей: $F' = F/c_p \rho \cong 0,15$ см·К/с (вблизи поверхности Венеры теплоемкость $c_p = 1,1$ Дж/(г·К), а плотность воздуха $\rho \cong 6 \cdot 10^{-2}$ г/см³).

Новым важным этапом изучения динамики венерианской атмосферы являлись исследования, осуществленные с помощью АМС «Вега-1, -2» [9, 43]. Функционирование спускаемого (СА) и поса-

дочного (ПА) аппаратов (рис. 5.2) обеспечило получение большого объема информации об атмосфере и поверхности Венеры. Впервые получены данные о скорости ветра путем слежения за дрейфом аэростатного зонда (АЗ) на высоте 54—55 км (рис. 5.3), где атмо-

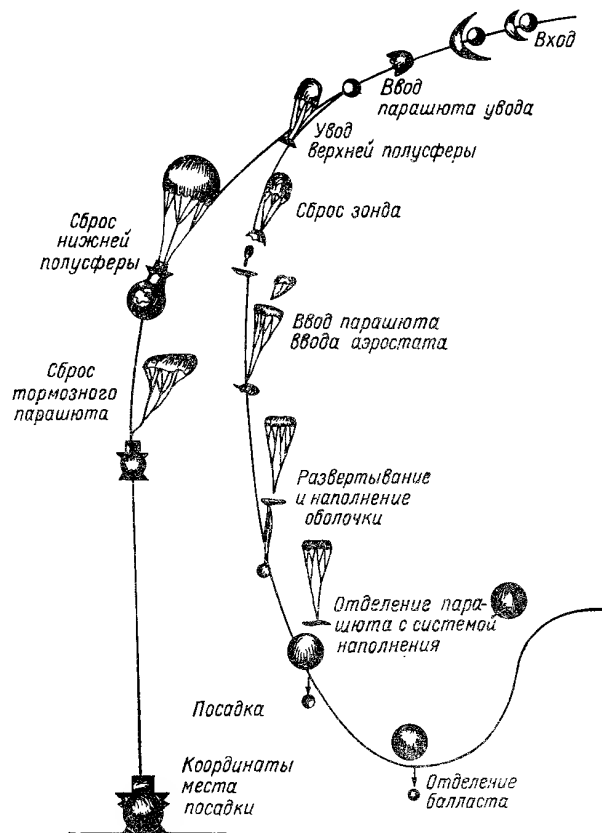


Рис. 5.2. Схема отделения и спуска СА и посадки ПА АМС «Вера-1, -2».

сферное давление составляет около $5 \cdot 10^4$ Па, а температура 40°C (на этой высоте зарегистрирована наиболее плотная часть облачного покрова). Каждый АЗ функционировал на протяжении 46 ч; за это время АЗ пролетает 12 тыс. км. В ходе дрейфа АЗ производились измерения температуры, давления, флуктуаций вертикальной скорости, дальности видимости в облаках и освещенности, а также регистрировались световые вспышки. Дрейф АЗ начинался на середине ночной стороны планеты и заканчивался на дневной стороне.

При предварительном анализе данных наблюдений выявлено наличие аномально активных процессов в слое облачности, характеризующихся мощными восходящими и нисходящими потоками.

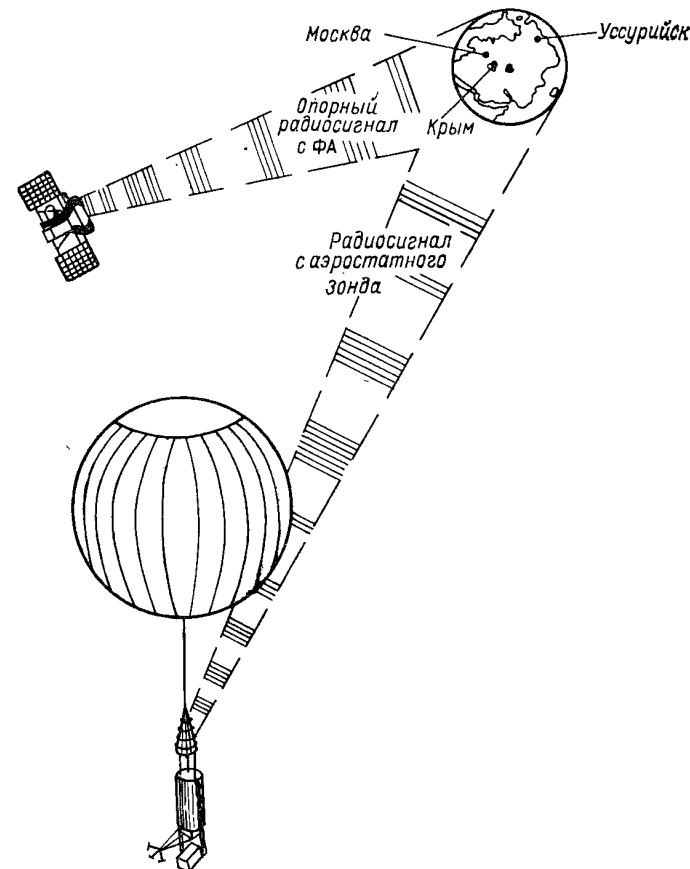


Рис. 5.3. Схема слежения за дрейфом аэростатного зонда.

Вдоль всей траектории дрейфа первого зонда температура оказалась на 8°C выше, чем вдоль траектории дрейфа второго зонда. Зарегистрированы световые вспышки, которые, возможно, соответствуют молниевым разрядам. Подтверждено существование сверхвращения атмосферы: скорость ветра достигала 60—70 м/с. Получены новые данные о содержании аэрозоля и водяного пара. Впервые путем прямых измерений подтверждено наличие серной кислоты в облаках Венеры и обнаружено присутствие хлора.

Продолжающийся анализ изображений облачного покрова и поляриметрических данных, полученных при помощи АМС

«Пионер—Венера», свидетельствует о том, что общая циркуляция атмосферы (ОЦА) на уровне осредненной верхней границы облаков является преимущественно зональной (восточной) при наличии небольшого меридионального компонента [145]. Данные наблюдений показывают наличие волн глобального масштаба и, возможно, существование солнечно-обусловленного компонента ОЦА.

Если бы результаты наблюдения за перемещением УФ неоднородностей облачного покрова относились к неизменному уровню, они могли бы быть использованы для анализа динамики ОЦА. Однако поле скорости, рассчитанное с использованием восстановленного поля температуры, показывает, что по крайней мере частично изменчивость наблюдаемой циркуляции связана с вариациями высоты верхней границы облаков, причем сама циркуляция является довольно устойчивой.

При анализе поля термического ветра, вычисленного из условия циклострофического баланса, выявлено наличие сбалансированной зональной циркуляции с четко выраженными струйными течениями в умеренных широтах при максимальной скорости ветра до 110—120 м/с, полученными в слое 50—40 гПа вблизи 45° широты в каждом из полушарий. Расчеты скорости ветра в слое 40—80 км хорошо согласуются с данными СА по зональному компоненту ветра и свидетельствуют о нарушении условий баланса вблизи границ этого слоя в низких широтах. Результаты вычислений зонального поля геострофического ветра согласуются с данными АМС «Маринер-10» и «Пионер—Венера» по прослеживанию облаков, если учесть вариации эффективной высоты прослеживаемых неоднородностей со временем. Как показал Лимей [145], в таком случае данные АМС «Пионер—Венера» относятся к наклонной поверхности, простирающейся от уровня 68 км (40 гПа) в низких широтах до 75 км (10 гПа) в умеренных широтах. Поляриметрические индикаторы поля ветра относятся к примерно параллельной поверхности, расположенной на 1—2 км выше эффективной верхней границы облаков. Следствием асимметрии поля температуры (ее причиной может быть порожденная вулканическими извержениями неоднородность глобального распределения оптической плотности и надоблачной дымки) является небольшая асимметрия балансовой зональной циркуляции.

Важным компонентом ОЦА может оказаться прямая (экватор — полюс) меридиональная циркуляция (аналог ячейки Гадлея) в слое $(1,0 \dots 0,8) \cdot 10^5$ Па, о наличии которой свидетельствуют обусловленные бароклинностью соленоиды, образующиеся в результате пересечения изобарических и изостерических (соответствующих постоянному удельному объему) и поверхностей. Достоверность поля ветра, рассчитанного по полю температуры, указывает на актуальность продолжения радиорефракционных наблюдений атмосферы Венеры.

В. В. Кержанович и др. [26] проанализировали результаты восстановления вертикальных профилей скорости ветра в атмосфере Венеры по данным доплеровских измерений при помощи

АМС «Венера-13» и «Венера-14» с использованием методики восстановления, аналогичной применявшейся для обработки данных АМС «Венера-9» — «Венера-12». Основная трудность решения задачи определяется тем, что доплеровский сдвиг частоты более чем на 99 % обусловлен движением аппарата по орбите, и лишь менее 1 % сдвига связано с воздействием ветра. Результаты измерений относятся примерно к 10 утра по местному времени (высота Солнца около 54°) в экваториальной зоне: 7,5° ю. ш. («Венера-13») и 13,2° ю. ш. («Венера-14»). Поскольку интерпретация данных измерений требует априорного задания направления ветра, принято (в соответствии с данными предшествующих экспериментов), что ветер является чисто зональным.

Вертикальные профили скорости ветра в обеих точках оказались сходными и согласуются с полученными ранее результатами. На всех высотах ветер направлен к западу, т. е. в сторону собственного движения планеты. Скорость ветра убывает с уменьшением высоты; она максимальна (70—90 м/с) в слое 45—50 км, мало изменяется (около 40 м/с) на высотах от 18—20 до 40—42 км и не превышает нескольких метров в секунду в нижнем 10-километровом слое. В интервале высот от 10—12 до 18—20 км имеет место зона некоторого нарастания скорости.

Отличительной особенностью рассматриваемых данных (по сравнению с результатами АМС «Венера-9 — Венера-12») является наличие резкого возрастания скорости ветра в слое 42—47 км, т. е. на несколько километров ниже облачного слоя. Здесь вертикальный градиент скорости близок к наблюдаемому в земных струйных течениях (до 10—12 м/(с·км)). Сравнительно слабая изменчивость профилей ветра свидетельствует о стабильности процессов, определяющих общую циркуляцию венерианской атмосферы. По данным «Венеры-14» среднее значение скорости восточного ветра на высоте 100 м равно $(1,1 \pm 0,8)$ м/с. Наблюдались заметные вариации скорости в облачном слое с амплитудой более 0,7—1 м/с за время около 20 с и более, которые можно интерпретировать как проявления турбулентности.

Ксанфомалити и др. [46] выполнили сопоставление данных, полученных при регистрации акустического шума на поверхности Венеры, с результатами продувок микрофона вместе с его арматурой в аэродинамической трубе малых скоростей, которое привело к значениям скорости ветра примерно 0,5 м/с в районе посадки «Венеры-13» и 0,30—0,35 м/с в районе посадки «Венеры-14». Анализ телевизионных снимков поверхности Венеры, полученных с обоих посадочных аппаратов, позволил определить направление ветра.

Наблюдения за перемещением частиц грунта по поверхности посадочного кольца привели к выводу, что скорость ветра не могла превосходить 0,6 м/с. Таким образом, скорость ветра в двух точках, расположенных вблизи экватора на расстоянии 970 км

(местное время в обеих точках близко к 10 ч утра), оказалась сходной и составила 0,3—0,5 м/с.

Как уже упоминалось, при исследовании атмосферы Венеры с помощью АМС обнаружено наличие сверхвращения и слоистой структуры атмосферы в глобальных масштабах. Зональное сверхвращение охватывает толщу атмосферы всей планеты на высотах 10—100 км при максимуме момента количества движения (МКД) на высоте около 20 км. Отношение МКД атмосферы к МКД тела планеты составляет около $1,6 \cdot 10^{-3}$, превышая в $6 \cdot 10^4$ раз соответствующее значение для Земли, где сверхвращение наблюдается лишь в экваториальных широтах (на Венере существует специфический механизм передачи МКД из средних в низкие широты).

Бламон [80] отметил, что отсутствие достаточно убедительной теории сверхвращения определяет необходимость дальнейших исследований общей циркуляции атмосферы Венеры, а также мезомасштабных и микромасштабных явлений. Важное значение имеет в связи с этим использование дрейфующей в атмосфере платформы. Поэтому в программу «Вега» включены наблюдения при помощи шара-зонда для определения соответствующих возможностей получения данных об изменчивости полей ветра и температуры. Анализ этих данных позволит выявить влияние конвективной и сдвиговой турбулентности, гравитационных волн, приливов и синоптических вихрей, т.е. характеризовать механизм микро- и мезомасштабного переноса в слое облачного покрова.

Успешное развитие исследований с целью численного моделирования общей циркуляции атмосферы, накопление значительного материала данных прямых измерений состава, структурных параметров и ветра создали основу для выполненных за последние годы теоретических работ. Г. С. Голицын [102] предпринял сопоставление данных о поле скорости ветра в атмосфере Венеры с выводами о скорости ветра и контрастах температур на основе теории подобия и размерностей. В работе [102] показано, что в нижней части атмосферы, содержащей примерно половину ее массы, соображения теории подобия приводят к лучшему согласию с данными наблюдений, чем в верхней атмосфере. Анализ результатов наблюдений ветра привел к заключению, что в медленно вращающейся атмосфере Венеры следует ожидать осуществления предложенного Сольбергом механизма инерциальной неустойчивости циркуляции по отношению к осесимметричным возмущениям (циркуляция устойчива к неосесимметричным бароклинным возмущениям).

Выполненные Вильямсом [218] численные эксперименты показывают, что циркуляция в меридиональной плоскости может распадаться на совокупность ячеек прямой и обратной циркуляции. Наличие подобных ячеек должно благоприятствовать сохранению МКД планеты и ее атмосферы. Суммарный МКД сил трения атмосферы о поверхность должен быть в среднем равен нулю.

Упомянутые результаты подтверждают гипотезу Шуберта и др. [180, 181] относительно многоячейковой структуры меридиональ-

ной циркуляции. Анализ данных об изменчивости атмосферной циркуляции со временем показал, что если МКД венерианской атмосферы может изменяться в пределах 30 % (на Земле подобные вариации составляют 50 %), то относительные вариации длины венерианских суток могут достигать 10^{-3} , т.е. нескольких часов.

Вследствие малой прозрачности атмосферы для теплового излучения, доминирующий вклад в теплообмен между поверхностью и атмосферой вносит турбулентность. Голицын [102] получил оценки основных параметров динамики теплового режима приповерхностного слоя атмосферы. Рассмотрение рефракции света в этом слое подтвердило обоснованность предварительных оценок, согласно которым наличие горизонта на панорамных снимках поверхности на расстоянии примерно 100 м следует объяснить существованием у поверхности сильного отрицательного градиента температуры.

Как показал Стоун [188], простые и наглядные возможности анализа закономерностей динамики планетарных атмосфер открывает определение и сопоставление характерных времен наиболее важных процессов. Одним из фундаментальных факторов динамики является приток тепла за счет излучения. Влияние радиационных процессов определяется двумя характерными временами: 1) продолжительностью охлаждения атмосферы выше уровня давления P после того, как прекращается нагревание за счет поглощения солнечной радиации $\tau_s = \frac{\tau_\eta H}{(\eta - 1) \sigma T^4}$ (H — шкала высот, η — отношение удельных теплоемкостей, σ — постоянная Стефана — Больцмана, T — температура на уровне P); 2) временем радиационной релаксации τ_η — тем временем, которое необходимо, чтобы при заданном приходе солнечной радиации нагреть атмосферу от нуля до температуры, соответствующей лучистому равновесию. Если единственным характерным вертикальным масштабом является шкала высот, то $\tau_s = \tau_\eta$.

В условиях атмосферы Венеры время радиационной релаксации изменяется от 109 с у поверхности до 10^5 с на высоте 80 км. Характерным масштабом времени реакции динамики атмосферы на лучистый приток тепла является характерное время адвекции — то время, которое необходимо для перемещения динамического возмущения на глобальное расстояние: $\tau_{\text{дин}} = \frac{R}{v}$ (R — радиус планеты, v — характерная горизонтальная скорость). Единственно возможной характерной скоростью является $v = \sqrt{gH}$ (g — ускорение свободного падения) — фазовая скорость внешней гравитационной или звуковой волны. В таком случае для Венеры типично время динамической релаксации, равное 10^5 с. Важным внешним характерным временем является период вращения вокруг оси $\tau_{\text{сут}} = 1,01 \cdot 10^7$ с.

Отношения характерных времен определяют роль различных процессов. Так, например, величина $\sigma = \tau_{\eta} / \tau_{\text{сут}}$ является показателем значения суточного хода. Расчеты для условий стандартной венерианской атмосферы показали, что на высотах меньше 56 км $\delta > 1$, а меньше 40 км $\delta \gg 1$, т. е. суточный ход практически отсутствует. Выше 56 км $\delta < 1$ и, следовательно, суточный ход проявляется существенно.

Величина $\gamma = \tau_{\text{дин}} / \tau_{\text{сут}}$, обратная числу Россби (с точностью до множителя 2,4), характеризует влияние силы Кориолиса на атмосферную циркуляцию. Для Венеры, как правило, $\gamma \ll 1$, т. е. кориолисова сила незначительна. Лишь в глубоких слоях атмосферы $\gamma = 1/2$ и поэтому учет силы Кориолиса имеет важное значение для объяснения зонального переноса в этих слоях. Вероятная скорость зонального движения составляет около 1 м/с.

Поскольку циркуляция в глубоких слоях атмосферы не зависит от $\tau_{\text{сут}}$, то в данном случае контролирующим безразмерным параметром должно быть отношение

$$\xi = \frac{\gamma}{\delta} = \frac{\tau_{\text{сут}}}{\tau_{\eta}} \approx \frac{\tau_{\text{дин}}}{\tau_s},$$

эквивалентное энергетическому критерию, введенному ранее Голицыным. Если $\xi \gg 1$, то это означает, что тепловой режим атмосферы определяется влиянием радиационных факторов (близко соответствует условиям лучистого равновесия). При $\delta \leq 1$ становятся существенными динамические факторы. Поскольку в глубоких слоях атмосферы Венеры всегда $\xi \ll 1$, то ясно, что в данном случае решающее значение приобретают динамические факторы.

Рассмотрение вертикального профиля δ приводит к необходимости выделения в атмосфере Венеры двух слоев с различными режимами циркуляции. В нижнем слое атмосферы (на высотах меньше 40 км) суточный ход отсутствует, вертикальный градиент температуры — почти адиабатический, а атмосферные движения слабо выражены. В верхней атмосфере (выше 70 км) суточный ход существен, вертикальный градиент температуры меньше адиабатического и наблюдается очень сильный зональный перенос (скорость ветра около 100 м/с) в направлении, совпадающем с вращением планеты.

Теоретический анализ циркуляции глубоких слоев атмосферы, основанный на теории подобия, находится в хорошем согласии с данными наблюдений. Гипотеза о наличии ячейки циркуляции Гадлея между экватором и полюсом с более обширной зоной восходящих движений, чем нисходящих, хорошо объясняет наличие адиабатической стратификации и отсутствие турбулентности, практическое отсутствие горизонтальных градиентов (контраст температуры экватор — полюс составляет около 0,1 К) и наблюдаемые значения горизонтального (примерно 2 м/с) и вертикального (примерно 0,5 м/с) компонентов скорости ветра.

На первый взгляд общая циркуляция атмосферы (ОЦА) Ве-

неры является с точки зрения динамической метеорологии простейшей по сравнению с ОЦА других планет ввиду медленности вращения Венеры (243 земных суток) и большой продолжительностью солнечных суток (117 земных суток), а также малого наклона орбиты (следовательно, отсутствия времен года). Отмеченные факторы позволили предположить симметричность ОЦА относительно экватора и побудили ряд авторов разработать двухмерные модели ОЦА, которая симметрична относительно оси Венера—Солнце.

Данные наблюдений и теоретических исследований, выполненных за последние годы, привели, однако, к выводу, что венерианская ОЦА намного сложнее, чем это предполагалось ранее. Основной чертой ОЦА на высотах более 50 км является сверхвращение атмосферы — зональная циркуляция со скоростью до 100 м/с, причем значительные зональные ветры наблюдаются и на меньших высотах. Меридиональный компонент ветра существенно меньше; он составляет не более 10 м/с на уровне верхней границы облачного покрова. Горизонтальные контрасты температуры, по-видимому, относительно малы. Разность между температурами дневной и ночной сторон планеты составляет 10 К или меньше, но разность между температурами экватора и полюса гораздо больше. Иногда обнаруживаются признаки существования планетарных волн.

Как отметили Янг и Поллак [220], достаточно полный анализ закономерностей венерианской ОЦА возможен лишь на основе трехмерного численного моделирования ОЦА, которое серьезно осложняется влиянием эффектов нелинейности и сильного взаимодействия между полями скорости и температуры, сопровождаемых каскадной передачей энергии от движений больших масштабов к движениям меньших масштабов. Янг и Поллак разработали более полную, чем ранее предложенные, трехмерную 16-уровневую модель общей циркуляции атмосферы Венеры. Эта модель использована прежде всего для расчетов среднего зонального поля ветра, которое может быть сопоставлено с данными наблюдений.

В модели, предполагающей почти адиабатичность атмосферы, приближенно учтены влияние лучистого притока тепла и параметризация мелкомасштабных движений. Принципиально важное значение для надежности численного моделирования имеет вопрос о продолжительности счета (начиная от состояния покоя), необходимой для достижения равновесного состояния атмосферной циркуляции. Принято, что равновесным с точки зрения среднего зонального поля ветра является такое состояние, при котором ветер изменяется за период 10 солнечных венерианских суток не более чем на 10 %. Наиболее продолжительное численное моделирование охватывало период около 15 солнечных венерианских суток (шаг по времени составлял около 1,5 ч).

Численное моделирование показало, что в зависимости от задания начальных условий возможны различные решения, причем значения скорости среднего зонального ветра могут различаться в 1,5—2 раза. В случае решения, которому соответствуют максимальные зональные скорости у экватора около 90 м/с, наблюдаются планетарные волны, которые представляют собой, по-видимому, вынужденные гравитационные волны Россби, распространяющиеся вдоль потока относительно среднего зонального ветра. Эти волны особенно четко проявляются в умеренных и высоких широтах и иногда приобретают очертания Y-образной структуры, расположенной около экватора.

В соответствии с данными наблюдений контрасты потенциальной температуры между экватором и полюсом (10—30 К) больше, чем между дневной и ночной сторонами планеты (5—10 К на высоте 60 км). Максимум потенциальной температуры на фиксированном круге широты располагается вблизи подсолнечного меридиана в случае решения, которому соответствует отсутствие планетарных волн, но при наличии волн максимум может иногда смещаться даже на ночную сторону планеты.

Максимальные температурные контрасты между дневной и ночной сторонами имеют место в умеренных широтах. Меридиональные скорости в умеренных и низких широтах не превосходят 10 м/с. Механизмом, ответственным за поддержание сильных зональных ветров, является нелинейная неустойчивость, проявляющаяся при взаимодействии средней меридиональной циркуляции и вихрей планетарного масштаба. Некоторые из полученных результатов показывают, что имеет место неустойчивость при амплитуде конечного размера. Этот вопрос требует, однако, дальнейших исследований.

Меридиональная циркуляция обуславливает перенос зонального компонента количества движения вверх. С вихрями планетарного масштаба связан главный механизм генерации потенциальной энергии. Эти вихри вносят также существенный вклад в горизонтальный перенос углового момента (момента количества движения). Вращение планеты играет важную роль в формировании первоначальной средней зональной циркуляции, начиная с состояния покоя.

Вскоре после «включения» нагревания за счет солнечной радиации возникает циркуляция от подсолнечной к противосолнечной точке при максимальной горизонтальной скорости около 15 м/с. На эту циркуляцию налагаются малые средние зональные ветры в умеренных широтах, обусловленные малыми силами Кориолиса, которые воздействуют на среднюю меридиональную циркуляцию. Вследствие первоначального совместного вращения атмосферы и твердой оболочки планеты, средняя меридиональная циркуляция переносит большие значения количества движения на экваторе вверх и ускоряет движение атмосферы в направлении вращения планеты. Вслед за тем под влиянием неустойчивости происходит усиление зонального ветра и в перенос момента коли-

чества движения решающий вклад начинают вносить планетарные вихри. Они продуцируют потенциальную энергию, которая превращается главным образом в среднюю зональную кинетическую энергию. При этом циркуляция на высотах больше 30 км практически нечувствительна к особенностям циркуляции на меньших высотах. Специальные численные эксперименты подтвердили, что вращение Венеры оказывает более существенное влияние на первоначальное формирование зональной циркуляции чем относительное движение зоны нагревания за счет солнечной радиации.

Дальнейшее совершенствование рассмотренной модели ОЦА должно быть связано прежде всего с более надежной параметризацией мелкомасштабных движений (пока не ясно, однако, как это сделать) и более точным учетом лучистого притока тепла за счет длинноволновой радиации. Планируется предпринять численное моделирование с использованием более высоко расположенного верхнего уровня (80 км) и с более точными граничными условиями на поверхности планеты.

Заканчивая обсуждение данных об атмосферной циркуляции на Венере, следует отметить, что постепенно вырисовывающаяся картина теплового режима и динамика венерианской атмосферы в настоящее время радикально отличается от представлений, существовавших еще несколько лет тому назад. Неожиданно сложной оказалась верхняя атмосфера: наземные наблюдения в сочетании с данными АМС позволили выявить сложные особенности глобальной циркуляции, которые выражаются в наличии волн планетарного масштаба, неустойчивостей и волн регионального масштаба, конвективных движений и др. Однако все еще нет полной уверенности в реальном существовании этих явлений, поскольку выводы о них получены по данным очень ограниченных наблюдений.

Остается нераскрытым механизм глобальной зональной (четырехсуточной) циркуляции в верхней атмосфере, причем не исключено, что эта циркуляция охватывает (при уменьшающейся скорости) столь глубокие слои атмосферы, что может оказаться необходимым пересмотр существующей концепции относительно спокойной атмосферы с доминирующей медленной циркуляцией Гадлея.

Как уже отмечалось, исследования венерианской атмосферной циркуляции в значительной степени основаны на теории подобия и размерностей, поскольку трехмерное численное моделирование циркуляции серьезно затрудняется существенно нелинейной природой атмосферных движений и сильным взаимодействием между полями скорости и температуры, что требует использования сложной трехмерной модели общей циркуляции атмосферы (ОЦА). Лишь в упомянутой выше работе Янга, Поллака [220] удалось осуществить численное моделирование ОЦА, которое удачно воспроизвело существование четырехсуточной циркуляции. Оказалось,

что эта циркуляция поддерживается за счет механизма нелинейной неустойчивости, связанного с особенностями средней меридиональной циркуляции и вихрей планетарных масштабов.

Как отметили Шуберт и др. [180], теоретические оценки привели к выводу, что следующие особенности Венеры являются наиболее существенными: 1) различие циркуляции в верхних и нижних слоях атмосферы (переходной зоной следует, по-видимому, считать слой 40—60 км, на границах которого наблюдается сильная турбулентность); 2) важная роль адвекции тепла на всех высотах; 3) значительный суточный и широтный ход в верхней атмосфере, приводящий к сравнимым по значению контрастам температуры день—ночь и экватор—полюс, а также к сравнимым меридиональным и зональным ветрам; 4) пренебрежимо малый суточный ход в нижних слоях атмосферы и медленная меридиональная циркуляция Гадлея (подъем воздуха над экватором и опускание в высоких широтах), обусловленная меридиональной изменчивостью нагревания; 5) адиабатическая, нетурбулентная структура глубинных слоев атмосферы; 6) циркуляция в термосфере от дневной к ночной стороне планеты; 7) отсутствие годового хода; 8) относительно слабое влияние силы Кориолиса.

Наибольшее внимание привлекает выяснение причин высокой температуры поверхности Венеры и ее глобальной однородности, быстрого вращения верхней атмосферы относительно твердой оболочки планеты, слабость меридиональных движений в верхней атмосфере. Хотя есть основание считать движение УФ неоднородностей облачного покрова индикатором реальности четырехсуточной циркуляции, остается все еще не ясным взаимодействие этой циркуляции и планетарных волн. В связи с этим важно установить: 1) существует ли зависимость скорости зональной циркуляции от долготы, особенно в подсолнечной зоне; 2) зависит ли скорость зонального ветра от высоты и существует ли отчетливое разделение атмосферы на верхнюю, где сосредоточены сильные ветры, и нижнюю. Центральной проблемой динамики венерианской атмосферы является выяснение природы четырехсуточной циркуляции, а также выявление наблюдаемых закономерностей и факторов, определяющих циркуляцию в нижних слоях атмосферы (роль циркуляции Гадлея, конвекции, волновых движений и др.).

Очень важное значение имеют исследования пространственно-временной изменчивости поля лучистого притока тепла за счет поглощения солнечной радиации, горизонтальных контрастов поля температуры, которые обуславливают характер атмосферной циркуляции. Требуют ответа вопросы о роли скрытого тепла, связанного с фазовыми превращениями, и компонента облаков, ответственного за УФ контрасты облачного покрова.

Большое внимание привлекают исследования динамики верхней атмосферы Венеры. Со времени обнаружения быстрого потока ионосферной плазмы с дневной стороны в зоне «вздутия» на противосолнечную сторону Венеры стало очевидно, что объяснение процессов в венерианской ионосфере вблизи терминаторов и на

ночной стороне возможно лишь с помощью двухмерных численных моделей ионосферы. В связи с этим Уиттен и др. [217] предложили двухмерную конечно-разностную модель, воспроизводящую динамику ионосферы, согласованную с решением уравнений движения плазмы, при учете инерциального члена.

Расчеты на основе этой модели показали, что она надежно воспроизводит наблюдаемое поле горизонтальной составляющей ветра в диапазонах зенитного расстояния Солнца 60—140° и высот 100—480 км. Значения ионной концентрации на дневной стороне оказались завышенными вследствие специфического выбора модели нейтральной атмосферы, а на ночной стороне заниженными за счет задания слишком малой высоты ионопаузы. Численное моделирование привело к выводу, что главными факторами, ответственными за ускорение плазмы до наблюдаемых скоростей, являются обусловленная Солнцем фотоионизация на дневной стороне и рекомбинация ионов на ночной стороне. По-видимому, наблюдаемый поток плазмы является достаточным для поддержания ночной ионосферы.

Глава 6

Эволюция Венеры

6.1. Происхождение планеты

В последнее время были опубликованы важные работы В. Л. Барсукова [10], В. П. Волкова [13], В. А. Краснопольского [42], В. И. Морозова и Л. М. Мухина [53], Ю. А. Суркова [68], посвященные эволюции Венеры и ее атмосферы. Анализ данных о строении и составе земной коры привел к выводу о неадекватности гипотезы образования планет путем однородной аккреции веществ типа углеродистых хондритов (основного компонента космического вещества), о чем свидетельствует состав метеоритов. Такой вывод можно распространить на все планеты земной группы.

Более вероятной является модель неоднородной аккреции, согласно которой вещество планеты должно прогрессивно накапливаться, начиная с конденсатов, образующихся при охлаждении первоначально горячей ($T > 2000$ К) солнечной туманности. В таком случае внутренние части планет составляют высокотемпературные конденсаты, а конденсаты, возникающие при более низкой температуре, прогрессивно добавляются снаружи. О достоверности модели неоднородной аккреции свидетельствует успешность ее применения для объяснения строения земной коры [212].

Ввиду близости диаметров и средних плотностей планет Земля и Венера они в течение долгого времени рассматривались как близнецы, хотя и были обнаружены некоторые существенные различия. Наличие на Венере очень крупных кратеров, большая часть которых является первоначальными (древними) ударными кратерами (как на Луне), побудило Шабера [177] предположить, что литосфера Венеры является более мощной, чем литосфера Земли, и обладает (подобно твердым оболочкам Марса, Меркурия и Луны) высокой вязкостью. Это может свидетельствовать о значительно более слабой тектонической и вулканической активности на Венере, чем на Земле.

Макгилл (см. [144]) предпринял пересмотр упомянутых представлений с целью ответить на следующие вопросы: 1) определить ли наличие больших и, по-видимому, первоначальных кратеров более слабую тектоническую и вулканическую активность на Венере, чем на Земле; 2) какова должна быть толщина венерианской литосферы, чтобы можно было обосновать модели температуры и содержания летучих компонентов в верхней части мантии Венеры; 3) могут ли недавние данные АМС «Венера» и «Пионер—Венера» о содержании ^{40}Ar в нижних слоях атмосферы Венеры помочь в выяснении вопроса о соотношении тектонической и вулканической активности на Венере и Земле.

Весьма вероятно, что температура твердой оболочки и верхней мантии на Венере выше, чем на Земле, и поэтому сухая ли-

тосфера Венеры может иметь толщину, сходную с толщиной земной литосферы. Если в мантии присутствуют следы летучих компонентов (менее 1% H_2O или $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$), это свидетельствует даже о более тонкой литосфере, чем земная. Отсутствие на Венере жидкой воды обуславливает замедление процессов эрозии и формирования отложений (по сравнению с земными условиями), благоприятствуя сохранению древних кратеров на части поверхности.

Геохимические модели происхождения Солнечной системы и петрологические данные свидетельствуют о том, что содержание калия на Венере и Земле примерно одинаково. Содержание ^{40}Ar находится в интервале 0,1—1,0 по отношению к земному. Поскольку высвобождение ^{40}Ar на Венере за счет эрозии относительно неэффективно, указанный интервал возможных значений содержания ^{40}Ar допускает развитие интенсивных тектонических процессов, причем это предположение становится необходимым, если содержание ^{40}Ar соответствует верхнему пределу упомянутого интервала.

Таким образом, нет оснований считать, что тектоника Венеры сходна с марсианской, поскольку на Венере существуют древние кратеры и сухая мантия. Вероятна модель венерианской тектоники, сходная с моделью земной тектоники. Условия на тектонически активной Венере с тонкой литосферой могут оказаться похожими на существовавшие в период докембрия на Земле.

Поскольку Венера и Земля близки по массе, средней плотности и положению в Солнечной системе, можно предполагать, что обе планеты образовались из более или менее одинакового вещества, испытали сходные эволюции и имеют похожие атмосферы. Так как последнее не соответствует действительности, представляет интерес обсуждение возможных факторов различия эволюции Венеры и Земли, которое стало причиной существенных различий их современной структуры и состава.

Масса атмосферы Венеры, состоящей главным образом из углекислого газа, равна $5,3 \cdot 10^{23}$ г, что очень близко соответствует содержанию CO_2 в земной коре ($5,1 \cdot 10^{23}$ г). Подобное совпадение побуждает предположить схожесть состава примитивных атмосфер Венеры и Земли, в ходе эволюции которых углекислый газ на Земле оказался захваченным земной корой, а на Венере сохранился в атмосфере благодаря высокой температуре поверхности. Подобные суждения являются, однако, весьма спекулятивными. Следует предположить, что на Венере, как и на Земле, атмосфера имеет вторичное происхождение, образовавшись за счет газов, выделенных твердой оболочкой планеты. В связи с этим различие моделей эволюции определяется неодинаковостью гипотез относительно дегазации. Одна из гипотез состоит в том, что дегазация произошла мгновенно в результате гравитационного нагревания. Вероятно, главной причиной, обусловив-

шей различие эволюций атмосфер Венеры и Земли, была невозможность конденсации водяного пара на поверхности Венеры, ввиду ее близости к Солнцу.

Это явление получило название «разгоняющегося» парникового эффекта, поскольку парниковый эффект, обусловленный водяным паром, вызывает более быстрое увеличение температуры поверхности планеты по мере роста парциального давления водяного пара, чем температуры конденсации. Существует критическое значение поглощенной планетой солнечной радиации, определяющее появление разгоняющегося парникового эффекта. По-видимому, на Венере поглощенная радиация превышает критическое значение.

Если предполагать, что примитивная атмосфера Венеры содержала много водяного пара (в количестве, обеспечивающем атмосферное давление у поверхности, равное $257 \cdot 10^5$ Па), то учет разрушения молекул воды в верхней атмосфере посредством фотоллиза и последующей диссипации водорода со скоростью порядка 10^{13} молекул/(см²·с) ($4,3 \cdot 10^{16}$ г/год для всей планеты) приводит к тому, что нужно всего 31 млн лет для полного уничтожения воды. Можно, во всяком случае, предположить, что за срок менее 200 млн лет в атмосфере должно было остаться не более нескольких процентов водяного пара. При малом содержании водяного пара происходило увеличение концентрации серной кислоты в каплях облаков и понижение парциального давления водяного пара до значений, наблюдаемых в настоящее время. По мере поглощения атмосферного кислорода твердой оболочкой состав венерианской атмосферы постепенно приближался к современному.

Гипотеза мгновенной дегазации иллюстрирует наиболее важные аспекты эволюции атмосферы Венеры. Использование альтернативной гипотезы медленной дегазации за время примерно 1 млрд лет приводит к иной эволюции атмосферы (отсутствует, в частности, стадия преобладания водяного пара) на ранних этапах, но к сходному заключительному этапу эволюции.

Исследования последних лет приносят все больше аргументов в пользу гипотезы, что атмосферы на планетах земной группы образовались в результате «взрывной», а не постепенной (медленной) дегазации твердых оболочек. Так, например, при анализе древнейших осадочных пород на Земле обнаружено, что еще около 3,3 млрд лет назад существовали атмосфера и гидросфера, т.е. могли возникнуть первые биологические процессы. Таким образом, жизнь на Земле в атмосфере, лишенной кислорода, могла появиться более 3,5 млрд лет назад.

В осадочных породах Земли, имеющих возраст около 3,3 млрд лет, обнаружена примерно такая же доля углерода органического происхождения, как и в настоящее время (соотношение между органическим и карбонатным углеродом составляет примерно 1:5). Накопление органического углерода началось около 3,7 млрд лет назад; это означает, что уже тогда происходил фо-

тосинтез. При достижении парциального давления O_2 , равного 1 % современного значения, стало возможным фотохимическое образование озона и, следовательно, постепенное развитие биологического щита Земли.

Таблица 6.1 содержит сводку оценок содержания водяного

Таблица 6.1

Содержание дегазируемых твердой оболочкой продуктов на планетах земной группы

Планета	C_{H_2O} , 10^5 Па		f'_{H_2O}	C_{CO_2} , 10^5 Па	
	гидросфера	литосфера		атмосфера	литосфера
Земля	300	30	$2 \cdot 10^{-4}$	—	70
Марс	—	~1	$3 \cdot 10^{-6}$	0,01	$\geq 0,2$
Венера	—	—	—	88	—

Планета	f'_{CO_2}	C_{N_2} , 10^5 Па		f'_{N_2}
		атмосфера	литосфера	
Земля	$0,7 \cdot 10^{-4}$	0,8	0,2	$1,5 \cdot 10^{-6}$
Марс	$\sim 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$\geq 6 \cdot 10^{-2}$	$\sim 10^{-8}$
Венера	10^{-4}	≤ 2	—	$2 \cdot 10^{-6}$

пара, углекислого газа и азота в атмосферах, гидросфере (Земля) и литосферах планет земной группы. Величина f' характеризует долю дегазируемого продукта по отношению к массе планеты. Поскольку литосфера Марса содержит $0,2 \cdot 10^5$ Па CO_2 и около $1 \cdot 10^5$ Па H_2O , вполне возможно, что (в соответствии с наблюдаемыми флювиальными структурами рельефа поверхности) на Марсе в прошлом могли существовать реки средней глубиной до 25 м (средняя толщина земного океана равна 3 км). Значения f' показывают, что масштабы дегазации на Земле и Венере были почти одинаковыми, тогда как на Марсе — примерно в 100 раз меньшими. Причиной столь различных масштабов дегазации были, вероятно, различия хода температуры в процессе эволюции планет.

Силл [185] предложил новую теорию эволюции венерианской атмосферы, основанную на медленном вращении планеты и примерно одинаковой дегазации водяного пара и углекислого газа. Первоначально поверхность Венеры напоминала лунную при температуре на ночной стороне примерно 90—100 К. Дегазируемые летучие компоненты конденсировались на ночной стороне и в полярных районах (как это сейчас происходит на Марсе) до тех пор, пока толщина ледяного покрова не становилась на-

столько значительной, что он не мог растаять в дневное время. Присутствие жидкой воды облегчило выветривание горных пород углекислым газом (этот процесс аналогичен образованию чилийской рудной селитры в аридных зонах Земли).

При пониженном атмосферном давлении, обусловленном углекислым газом, существенную роль играла фотодиссоциация водяного пара. Спустя 1 эон около 10^7 Па углекислого газа было связано в карбонатах и примерно 10^7 Па водяного пара подверглось фотодиссоциации. После того как «ледяные шапки» уменьшились до такого уровня, когда была исключена возможность образования жидкой воды, прекратилось и выветривание углекислым газом.

Последующая дегазация углекислого газа, усиливаемая метаморфическим обезуглероживанием известняка, обусловила уменьшение прозрачности атмосферы. Возникшие в результате парниковый эффект и уменьшение альбеда поверхности по мере испарения льда обусловили повышение температуры поверхности до значений, превышающих 400 К. Это вызвало разложение карбонатов поверхностного слоя коры и усиление выхода углекислого газа в атмосферу. В конечном счете сформировалась современная сухая и горячая углекислая атмосфера Венеры.

Наблюдаемая плотность Венеры на 17 % меньше того значения, которое могло бы быть, если бы Венера имела такие же состав и структуру, как Земля. Подобное различие можно, вообще говоря, объяснить дифференциацией частиц металлов из силикатных частиц в протопланетной туманности до начала процесса аккреции, в результате чего происходила аккреция Венеры из обедненного металлами материала. Такого рода модель наталкивается, однако, на серьезные трудности при объяснении процессов физической дифференциации и детального химического состава земной мантии.

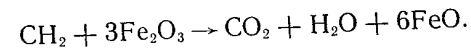
Рингвуд и Андерсон [170] рассмотрели две альтернативные гипотезы, объясняющие упомянутые различия плотности в терминах процессов химического фракционирования. Обе гипотезы исходят из предположения, что относительное содержание основных элементов (Fe, Si, Mg, Al, Ca) на обеих планетах одинаково. Согласно первой гипотезе, большая часть железа на Венере присутствует в форме окислов железа в мантии. Из этой модели вытекает, что Венера окислена в большей степени: $([FeO]/[FeO + MgO] = 0,24)$, чем Земля $([FeO]/[FeO + MgO] = 0,12)$, и имеет меньшую внутреннюю плотность (приведенную к эквивалентным давлению и температуре) вследствие присутствия большого количества кислорода. По-видимому, разная степень окисления на двух планетах обусловлена неодинаковым нагреванием в процессе аккреции из-за относительно меньшей массы Венеры.

Вторая гипотеза предполагает, что мантия Венеры почти лишена окислов железа, а различие внутренних плотностей приписывается тому, что аккреция происходила на Земле при более низкой температуре, чем на Венере, поскольку Земля находилась

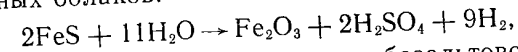
дальше от центра протопланетной туманности, чем Венера. По этой причине на Земле произошла аккреция значительного количества серы, чего не случилось на Венере. Вошедшая в состав земного ядра сера со сравнительно высокой относительной молекулярной массой обусловила возрастание средней плотности Земли. Вторая гипотеза предполагает также, что большая часть земного калия вошла в состав ядра.

Рингвуд и Андерсон [170] выполнили сопоставление рассмотренных гипотез в свете существующих наблюдательных данных. Если исходить из второй гипотезы, то плотность Венеры оказывается лишь на 0,4 % меньше земной. Существует также целый ряд других факторов, противоречащих этой гипотезе и не согласующихся с вытекающим из первой гипотезы выводом о том, что Венера в большей степени окислена, чем Земля. Если аккреция Венеры происходила примерно в таких же условиях, в каких происходила аккреция Земли, остается неясным различие в содержаниях водяного пара на обеих планетах.

Имеются, однако, два обстоятельства, свидетельствующие о том, что Венера не является в действительности такой «сухой», как это может казаться. Одно из обстоятельств состоит в том, что при окислении углеводородных соединений в твердой оболочке планеты до углекислого газа продуцируется большое количество воды:

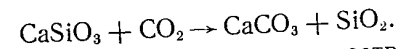


Второе — связано с обнаружением на поверхности Венеры калия и урана, что свидетельствует о присутствии гранитов, образование которых на Земле происходило при высоком парциальном давлении водяного пара. По-видимому, дефицит водяного пара на Венере обусловлен влиянием интенсивной фотодиссоциации, которая сопровождалась диссипацией водорода и связыванием кислорода путем образования Fe_2O_3 из FeO. Возможно также, что большое количество воды было израсходовано на образование сернокислотных облаков:



причем FeS был главным компонентом базальтовой магмы.

Как отметили Донахью и др. [97], количество первоначально выделившегося углекислого газа на Венере и Земле было, по-видимому, примерно одинаковым (около $5 \cdot 10^{23}$ г). Однако на Венере почти весь CO_2 остался в атмосфере, тогда как в процессе эволюции Земли $3/5$ углекислого газа или более оказалось связанным в земной коре в форме карбонатов, которые образовались по реакции:



Эта или аналогичные реакции легко осуществляются при наличии на Земле $1,4 \cdot 10^{24}$ г дегазированного корой водяного пара,

в результате конденсации которого образовались моря и океаны, что также способствовало аккумуляции CO_2 . Если на Венере и могло произойти образование карбонатов, то при современной температуре у поверхности, достигающей 750 К, углекислый газ должен полностью перейти в атмосферу.

Диссоциация водяного пара и сопровождающая ее диссипация водорода способствовали постепенному обогащению земной атмосферы кислородом и развитию жизни после того, как наличие кислорода привело к образованию слоя озона и сделало возможным жизнь вне океанов («взрывное» развитие жизни началось около 600 млн лет назад). Специфика Венеры определяется отсутствием $1,4 \cdot 10^{24}$ г жидкой воды, имеющейся в земных условиях. До сих пор остается неясной судьба венерианского водяного пара, если верно предположение, что его выделилось из твердой оболочки в атмосферу столько же, сколько на Земле. Поэтому следует предположить, что Венера сформировалась из таких горных пород, которые не содержали значительного количества воды, а дегазированный CO_2 не испытал эволюции, подобной земной.

В связи с этим важно найти объяснение эволюции парникового эффекта. Второй важной целью является понимание метеорологии Венеры. Поскольку погодообразующие процессы на Венере не так сложны, как на Земле, изучение более простой венерианской модели погоды и климата может оказаться полезным для решения задач земной метеорологии. При этом важно, в частности, изучить реальные притоки тепла, определяющие атмосферную циркуляцию на Венере, путем непосредственных наблюдений.

Еще одна принципиально важная проблема состоит в исследовании процессов вертикального переноса различных компонентов и свойств венерианской атмосферы. Малая степень диссоциации CO_2 в атмосферах Венеры и Марса и медленная диссипация водорода являются показателями того, что процессы вертикального переноса оказываются на этих планетах гораздо более эффективными, чем на Земле (эффективный коэффициент вертикальной диффузии превосходит земной на два-три порядка).

Обнаружение по данным АМС «Венера-11 и -12» и «Пионер—Венера» по крайней мере в 50 раз более высокой концентрации аргона в венерианской, чем в земной атмосфере, побуждает пересмотреть теорию эволюции атмосферы планеты. Возможно, главным источником благородных газов для Венеры было Солнце. В период формирования твердой оболочки частицы протопланетного облака аккумулировали такое количество аргона-36 из солнечного ветра, которое соответствует наблюдаемой концентрации аргона. Эти частицы в значительной степени блокировали солнечный ветер, затрудняя его поступление к Земле и оставляя на Земле лишь гораздо меньшее количество аргона. Поскольку содержание криптона на Солнце мало, это согласуется с американскими данными о более низкой концентрации криптона в венерианской атмосфере (около 50 млрд^{-1}), чем следует из данных АМС «Венера» ($700\text{—}1200 \text{ млрд}^{-1}$).

С целью анализа достоверности различных гипотез о происхождении и эволюции планетных атмосфер Поллак и Блэк [157] выполнили сопоставление данных об относительном содержании газовых компонентов (определяемом как отношение массы рассматриваемого газа к массе соответствующего небесного тела) и изотопных соотношений для Венеры, Земли и Марса, метеоритов и Солнца (табл. 6.2 и 6.3). В случае венерианской атмосферы использованы данные установленных на большом спускаемом аппарате (БСА) и транспортном космическом аппарате (ТКА) «Пионер—Венера» (П—В) нейтральных масс-спектрометров (НМС), а также газовых хроматографов (ГХ). В табл. 6.2 и 6.3 приведены, кроме того, результаты измерений при помощи масс-спектрометров (МС) и ГХ, установленных на АМС «Венера-11, -12» (В-11, -12).

В табл. 6.2 отдельно воспроизведены данные для нерадиогенного (nr) и радиогенного (p) аргона.

Представленные данные свидетельствуют о том, что относительное содержание азота и углекислого газа на Венере и Земле одинаково. Однако содержание N_2 на Марсе значительно ниже. Как содержание ^{36}Ar , так и отношение концентраций изотопов $^{36}\text{Ar}/^{14}\text{N}$ ступенчато убывают на порядок для последовательности Венера—Земля—Марс, но в случае $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ имеет место противоположная тенденция. Изотопные отношения для первичных (нерадиогенных) редких газов (например, $^{20}\text{Ne}/^{36}\text{Ar}$) планет земной группы и хондритных метеоритов весьма близки по значению, но сильно отличаются от соответствующего солнечного аналога (и, по-видимому, от значений для первичной солнечной туманности, из которой образовались планеты и метеоритные тела).

Все эти факторы побудили авторов [157] отвергнуть модели, согласно которым первичные атмосферы планет возникли в результате захвата газов или вещества с высоким содержанием летучих компонентов после образования планет. Наиболее полно удовлетворяют данным наблюдений гипотеза аккреции зерен, согласно которой летучие компоненты появились в результате аккреции зерен вещества и планетозималей в процессе формирования планет.

Общепринятая концепция ранней эволюции Солнечной системы исходит из предположения, что захват летучих компонентов происходит на стадии выхода из туманности в ходе эволюции солнечной туманности, когда существовал сильный градиент температуры в зоне планет земной группы. Однако данные АМС «Венера» и «Пионер—Венера» по содержанию благородных газов не согласуются с такой стандартной картиной, поскольку упомянутое предположение означает, что должно иметь место противоречащее наблюдениям сильное уменьшение содержания ^{36}Ar на Венере по сравнению с его содержанием на Земле, так как первичная туманность была более горячей в районе Венеры, чем Земли.

Таблица 6.2
Массовая доля газовых компонентов

Небесное тело	Аппаратура	Ne	Ar (np)	Kr	Xe
Венера (П—В)	НМС (БСА)		$(5 \pm 4) \cdot 10^{-9}$	$< 4 \cdot 10^{-10}$	
Венера (П—В)	НМС (ТКА)		$\sim 8 \cdot 10^{-9}$		
Венера (П—В)	ГХ	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-10}$	$(8 \pm 2) \cdot 10^{-10}$	$< 4 \cdot 10^{-11}$	
Венера (В-11, -12)	МС	$(6 \pm 1) \cdot 10^{-10}$	$(7 \pm 2) \cdot 10^{-9}$	$(2 \pm 0,4) \cdot 10^{-10}$	
Венера (В-11, -12)	ГХ		$(2 \pm 1) \cdot 10^{-9}$		
Земля		$1,1 \cdot 10^{-11}$	$4,6 \cdot 10^{-11}$	$2,9 \cdot 10^{-12}$	$1,6 \cdot 10^{-11}$
Марс		$(4 \pm 2,5) \cdot 10^{-14}$	$(2,2 \pm 0,3) \cdot 10^{-13}$	$\sim 2 \cdot 10^{-14}$	$\sim 9 \cdot 10^{-15}$
Метеориты					
обычные хондриты			$3 \cdot 10^{-12} \dots 1 \cdot 10^{-9}$		
углеродистые хондриты			$4 \cdot 10^{-10} \dots 1 \cdot 10^{-9}$		
Солнце		$1,7 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$9,7 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$

Небесное тело	Аппаратура	Ar (p)	N ₂	CO ₂	H ₂ O
Венера (П—В)	НМС (БСА)	$(5 \pm 4) \cdot 10^{-9}$	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-6}$		
Венера (П—В)	НМС (ТКА)	$\sim 7 \cdot 10^{-9}$			
Венера (П—В)	ГХ	$(8 \pm 2) \cdot 10^{10}$	$(2,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-6}$	$(9,5 \pm 0,1) \cdot 10^{-5}$	$(6 \pm 1) \cdot 10^{-8}$
Венера (В-11, -12)	МС	$(7 \pm 2) \cdot 10^9$	$(2,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-6}$	$9,4 \cdot 10^{-5}$	
Венера (В-11, -12)	ГХ	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-9}$	$(1,5 \pm 0,37) \cdot 10^{-6}$	$9,7 \cdot 10^{-5}$	$< 6 \cdot 10^{-9}$
Земля		$1,1 \cdot 10^{-8}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$
Марс		$(5,4 \pm 0,8) \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-8} \dots 4 \cdot 10^{-7}$	$> 3,5 \cdot 10^{-8}$	$> 5 \cdot 10^{-6}$
Метеориты					
обычные хондриты					
углеродистые хондриты					
Солнце			$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$9,5 \cdot 10^{-8}$

Таблица 6.3

Изотопные отношения для различных компонентов

Небесное тело	Аппаратура	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{20}\text{Ne}/^{36}\text{Ar}$	$^{84}\text{Kr}/^{36}\text{Ar}$	$^{132}\text{Xe}/^{36}\text{Ar}$
Венера (П—В)	НМС (БСА)	$1,2 \pm 0,1$	0,2	$0,5 \pm 0,3$	$< 0,02$	
Венера (П—В)	НМС (ТКА)	~ 1				
Венера (П—В)	ГХ			$0,6 \pm 0,3$	$< 0,01$	
Венера (В-11, -12)	МС	$\sim 1,2$	0,2	$0,2 \pm 0,1$	$0,01 \pm 0,005$	
Венера (В-11, -12)	ГХ				$0,02 \pm 0,01$	
Земля		292	0,2	0,5	0,036	$2,9 \cdot 10^{-2}$
Марс		3000 ± 50	$0,2 \pm 0,02$	$0,5 \pm 0,3$	$0,03 \pm 0,02$	
Метеориты (обычные и углеродистые хондриты)			0,2	$\sim 0,2$	$0,022 \pm 0,007$	$(3 \pm 1) \cdot 10^{-2}$
Солнце				31	0,00027	$1,4 \cdot 10^{-5}$

Небесное тело	Аппаратура	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	$^{36}\text{Ar}/^{12}\text{C}$	$^{36}\text{Ar}/^{14}\text{N}$	$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$	N/C
Венера (П—В)	НМС (БСА)	$0,012 \pm 0,001$	$(6 \pm 5) \cdot 10^{-5}$	$(7 \pm 6) \cdot 10^{-4}$	$(3,6 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$0,07 \pm 0,05$
Венера (П—В)	НМС (ТКА)					
Венера (П—В)	ГХ		$(8 \pm 2) \cdot 10^{-6}$	$(1 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$		$0,07 \pm 0,003$
Венера (В-11, -12)	МС	$0,011 \pm 0,001$	$(6 \pm 2) \cdot 10^{-5}$	$(7 \pm 2) \cdot 10^{-4}$		$0,09 \pm 0,01$
Венера (В-11, -12)	ГХ		$(2 \pm 1) \cdot 10^{-5}$	$(3 \pm 1) \cdot 10^{-4}$		$0,05 \pm 0,01$
Земля		0,011	$3 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	0,05
Марс		$0,011 \pm 0,0005$	$6 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-7} \dots 2 \cdot 10^{-6}$	$(6,1 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$	
Метеориты (обычные и углеродистые хондриты)			$(8,5 \pm 3,5) \cdot 10^{-9}$	$(4 \pm 3) \cdot 10^{-7}$		$0,03 \pm 0,02$
Солнце				$8,4 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	0,31

Поллак и Блэк [157] обратили внимание на то, что данные табл. 6.2 и 6.3 можно согласовать с гипотезой аккреции зерен, если сделать некоторые дополнительные предположения. Примем, что на единицу массы протопланетной туманности приходилось одинаковое количество С, N и H_2O вне зависимости от местоположения в пределах туманности. Количество благородных газов, входящих в состав вещества туманности, пропорционально давлению и экспоненциально убывает с ростом температуры. Если в период аккреции благородных газов температура была сравнительно изотермической, должен доминировать эффект давления, т.е. следует ожидать возрастания отношений $^{36}Ar/^{12}C$ и $^{36}Ar/^{14}N$ с уменьшением расстояния от центра туманности, что соответствует данным табл. 6.3.

Для количественного воспроизведения данных табл. 6.2 и 6.3 следует принять существование различной эффективности дегазации и градиентов давления в пределах туманности и выделить два периода дегазации. Большая часть летучих компонентов (за исключением ^{40}Ar) могла оказаться в составе планетных атмосфер еще на ранней стадии эволюции, когда планета претерпевала интенсивную внутреннюю дифференциацию. Содержание же ^{40}Ar определялось более поздней эволюцией, связанной с локальным вулканизмом и (или) тектонической активностью на протяжении всего периода эволюции вплоть до настоящего времени.

Если P , e_1 и e_2 — соответственно отношения давления в туманности, эффективности ранней и более поздней дегазации на рассматриваемом небесном теле к соответствующим величинам на Земле, то отношение $^{36}Ar/^{14}N$ окажется в 20 раз большим для Венеры (данные ГХ) при $P=20$, $e_1=1$, $e_2=1/15$ и в 200 раз большим (данные НМС), если $P=200$, $e_1=1$, $e_2=1/15$. Менее эффективную дегазацию Венеры на поздней стадии эволюции можно объяснить влиянием большой пластичности поверхностных горных пород, вследствие высокой температуры. Данные для Марса наилучшим образом соответствуют $P \cong 1/40 \dots 1/20$, $e_1=1/5 \dots 1/20$ и $e_2=1/20$.

Если гипотеза аккреции зерен правильна, то следует считать, что «усвоение» летучих компонентов происходило в основном в течение второй стадии эволюции протопланетной туманности. Однако и эту гипотезу нельзя считать бесспорной. Прежде всего, тщательной проверки требует возможность существования упомянутых условий — давления и температуры. Необходимо также найти объяснение различиям суммарной плотности планет земной группы. В случае справедливости рассматриваемой гипотезы из нее следует ряд очень важных выводов. В частности, оценки общей массы дегазированного CO_2 на Марсе определяют возможность существования в прошлом атмосферного давления ($1 \dots 3 \cdot 10^5$ Па, т.е. условий, благоприятствующих значительно более теплomu климату на ранней стадии эволюции планеты. Оценки дегазированной H_2O дают значение, эквивалентное слою льда 80—160 м, равномерно покрывающему Марс, что вполне доста-

точно для объяснения наблюдаемых на Марсе флювиальных каналов.

Большой интерес представляют перспективы дальнейших исследований Венеры и других планет. Сформированный НАСА Комитет по исследованиям Солнечной системы рекомендовал программу исследований до 2000 г., которая предусматривает четыре основные миссии: 1) радиолокационное картирование Венеры при пространственном разрешении около 1 км, радиовысотомерные и гравитационные наблюдения (запуск АМС намечен на 1988 г.); 2) наблюдения состава поверхности Марса, магнитного поля (если оно существует), годового хода содержания углекислого газа, водяного пара и пыли в атмосфере при помощи искусственного спутника Марса в течение одного марсианского года (1990 г.); 3) встреча АМС «Маринер—Марс-2» с короткопериодической кометой (возможен выбор комет Энке, Темпель-2 и Хонда—Мркоз—Пайдусакова) для определения газового и пылевого состава кометы и окружающей ее среды после пролета астероида Мейнбелт (середина 1990 г.); 4) радиолокационное картирование и дистанционное зондирование Титана — спутника Сатурна, температура которого настолько низкая, что допускает образование бассейнов жидкого метана. По-видимому, эта миссия будет сопровождаться запуском искусственного спутника Сатурна для изучения его атмосферы, магнитосферы, спутников и колец. Анализируются другие возможные миссии, которые пока неприемлемы из-за их высокой стоимости: взятие и доставка на Землю проб марсианского грунта, дрейфующая станция в атмосфере Титана и др.

6.2. Изменения климата

Анализ факторов изменчивости климата на различных планетах требует учета изменений солнечной постоянной, обусловленных вариациями параметров орбит; газового и аэрозольного состава атмосфер; круговоротов летучих веществ; свойств подстилающих поверхностей и особенностей внутреннего строения планет. За исключением, возможно, последнего фактора, все другие, несомненно, играли ведущую роль в эволюции климатов планет земной группы. Убедительной иллюстрацией влияния условий инсоляции (солнечной постоянной) и других факторов на особенности климата планет земной группы являются данные, приведенные в табл. 6.4, составленной Поллаком [158].

Ввиду сравнительной малости солнечных постоянных Земли и Марса почти весь выделившийся из твердой оболочки водяной пар и углекислый газ сконцентрирован на поверхности, а не в атмосфере, что определяет умеренность парникового эффекта атмосферы. Противоположная ситуация имеет место на Венере. Наклон орбиты к плоскости экватора и эксцентриситет — параметры орбит, определяющие изменчивость солнечной постоянной, —

Таблица 6.4

Факторы климата планет земной группы

	Венера	Земля	Марс
Солнечная постоянная, 10^8 Вт/м ²	5,17	3,70	1,16
Глобальное альbedo	0,77	0,28	0,24
Излучательная способность *	$8 \cdot 10^{-3}$	0,6	0,9
Температура поверхности, К	750	290	218
Атмосферное давление, гПа	90 000	1000	6
Ускорение свободного падения, см/с ²	872	980	372
Расстояние до Солнца, а. е.	0,72	1,00	1,52
Газовый состав	0,95 CO ₂ ; 10 ⁻³ H ₂ O; 10 ⁻⁴ CO	0,77 N ₂ ; 0,21 O ₂ ; 0,009 Ar; 0,01 H ₂ O; 3 · 10 ⁻⁴ CO ₂	0,96 CO ₂ ; 0,025 N ₂ ; 0,015 Ar; 10 ⁻⁴ H ₂ O;
Атмосферный аэрозоль	Сернокислотные облака	Водные облака; различные аэрозоли; вулканические, почвенные, фотохимические соли	Пыль и лед (H ₂ O и CO ₂)

* Излучательная способность определена по формуле: $(1 - A)S\pi R_p^2 = 4\pi R_p^2 \epsilon T_s$, где A — альbedo; S — солнечная постоянная; R_p — радиус планеты; σ — постоянная Стефана — Больцмана; ϵ — излучательная способность; T_s — температура поверхности.

могли варьировать в пределах 22,1—24,5°; 0—0,06 на Земле и 14,9—35,5°; 0—0,14 на Марсе. Несмотря на предполагаемую более низкую светимость Солнца в прошлом, климаты Земли и Марса характеризовались наличием более теплых периодов на ранних стадиях эволюции планет, что было связано с усилением парникового эффекта, обусловленным спецификой состава атмосферы.

Расчеты влияния изменений атмосферного давления и состава атмосферы на тепловой режим марсианской атмосферы, показали, что периоды повышения температуры легче объяснить с учетом состава примитивной, чем современной окисленной атмосферы. Более слабое гравитационное поле, возможное влияние изменения параметров орбиты и относительно более интенсивная дегазация твердой оболочки после ее формирования на Марсе, по-видимому, свидетельствуют о большей кратковременности периодов мягкого климата на этой планете, чем на Земле. При угле наклона плоскости орбиты Марса к плоскости экватора $\delta \approx 35^\circ$ летняя минимальная температура оголенной поверхности в полярной зоне достигает 273 К. Столь высокая температура ока-

зывает серьезное влияние на круговороты летучих компонентов (особенно H₂O) и процессы, происходящие в полярных районах.

Такие явления, как, например, вулканизм, привели к уменьшению δ в результате изменения скорости вращения и момента инерции. Поэтому в прошлом могли иметь место значения $\delta = (33,5 \pm 11,4)^\circ$. Возрастание минимального значения δ оказывает существенное влияние на значение минимального атмосферного давления и в связи с этим на диссипацию азота. При $\delta \approx 45^\circ$ температура поверхности полярной зоны летом повышается до 300 К, а вся планета в области широт больше 50° приобретает среднесуточную температуру в середине лета, превышающую 273 К. Вследствие высокой температуры полярных районов в атмосферу может поступать большое количество водяного пара, что способствует дальнейшему повышению температуры за счет парникового эффекта. Подобными условиями легко объяснить наличие флювиальных структур марсианского рельефа в экваториальной полосе. Однако низкие значения инсоляции, малое атмосферное давление и небольшой вертикальный градиент температуры налагают сильные ограничения на проявление эффекта разогревания на Марсе.

Как высокая температура поверхности Венеры, так и тяжелая атмосфера этой планеты обусловлены, по-видимому, значительно более высоким (примерно в два раза) уровнем инсоляции, чем на Земле. Подобная специфика могла обусловить наличие на Венере «разгоняющегося» парникового эффекта, т.е. сосредоточение всех летучих компонентов в атмосфере, а не в резервуарах жидкой или твердой фазы компонентов на поверхности. Если, однако, Венера формировалась при малом количестве или полном отсутствии воды, она могла всегда иметь окислительную атмосферу. В таком случае понижение светимости Солнца могло на ранних этапах эволюции Венеры привести к умеренным значениям температуры поверхности.

Квазипериодические осцилляции эксцентриситета орбиты и наклона орбиты к плоскости эклиптики могли вносить вклад в изменение климата на Земле в течение ледниковых и межледниковых периодов плейстоцена, а также образование слоистых отложений в полярных районах Марса. Предполагается, что на Марсе два совместно действующих механизма обуславливают образование слоистых структур грунта. Один из них связан с тем, что пылевые частицы служат центрами конденсации водяного пара и углекислого газа; образующиеся частицы имеют большие размеры и соответственно более высокую скорость оседания, чем частицы пыли или обводненные частицы пыли. Поэтому пыль и водный лед оседают преимущественно в полярных районах, формируя слоистые отложения.

Второй механизм обусловлен изменениями угла наклона орбиты к плоскости эклиптики, которые вызывают вариации атмо-

сферного давления и температуры поверхности в полярных районах, следствием чего является изменение содержания частиц пыли и водного льда в атмосфере. Дрейф континентов на Земле мог вызвать существенные изменения климата на отдельных континентах и способствовать возникновению оледенений в период плейстоцена за счет смещения континентов в полярные широты. Хотя на Марсе перемещений континентов не происходило, тектонические деформации его литосферы при определенных обстоятельствах могли служить причиной изменений наклона орбиты к плоскости эклиптики и, следовательно, порождать значительные вариации климата.

Важным климатообразующим фактором на всех рассматриваемых планетах является атмосферный аэрозоль, присутствие которого существенно изменяет радиационный режим планет. На Земле вулканический аэрозоль, по-видимому, служил существенным фактором изменений климата в масштабах времени от 1 до 10^6 лет, а для будущего серьезное значение имеет учет возможного влияния на климат аэрозоля антропогенного происхождения. На Марсе тепловой режим атмосферы подвергается радикальным изменениям в периоды глобальных пылевых бурь. Сернокислотные облака Венеры оказывают решающее влияние на тепловой баланс этой планеты. Вторжения комет на Венеру могли обусловить значительный дополнительный источник водяного пара и серосодержащих газов в венерианской атмосфере, что могло существенно сказаться на свойствах облаков.

Продолжая предпринятый Поллаком [158] сравнительный анализ, Тэйлор [199] сопоставил условия в атмосферах Венеры, Земли и Марса, рассмотрев влияние внешних факторов на состав (особенно количество облаков и пыли) и тепловой режим атмосфер. Несмотря на существенные различия составов атмосфер Земли и двух других планет, во всех случаях наиболее важными оптически активными компонентами являются углекислый газ и водяной пар; по количеству облаков Земля занимает промежуточное место.

Расчеты среднеглобальных вертикальных профилей температуры на основе использования радиационно-конвективной модели (при заданных составе атмосфер и характеристиках облачности) привели к хорошему согласию с данными наблюдений (за исключением термосферы и экзосферы Венеры и, возможно, Марса, которые оказались гораздо холоднее, чем следует из расчетов). Значительно сложнее (даже для Земли) обстоит дело с воспроизведением трехмерных полей температуры путем численного моделирования общей циркуляции атмосфер, причем главная трудность связана с учетом взаимодействия радиации и динамики, особенно с точки зрения роли волновых движений различных пространственно-временных масштабов. На Венере остается совершенно неизученным, например, определяющими высокоширотное поле температуры в слое $(0,01 \dots 1) \cdot 10^5$ Па механизм формирования и поддержания циркумполярного «воротничка» — волно-

вые движения планетарных масштабов, обладающие большой интенсивностью и продолжительностью (сходное явление существует и на Марсе).

Перспективы дальнейшего развития сравнительной планетологии атмосфер связаны прежде всего с разработками в следующих трех направлениях: 1) совершенствование радиационно-динамических моделей атмосфер; 2) достижение лучшего понимания процессов формирования атмосферной циркуляции; 3) получение более полных данных наблюдений. В условиях Марса особое внимание привлекают такие явления, как трансформация углекислого газа (попеременное отложение сухого льда в полярных шапках и поступление CO_2 в атмосферу, вызывающие сильную модуляцию атмосферного давления), пылевые бури и волновые движения.

Численное моделирование общей циркуляции атмосферы (ОЦА) на Земле, осуществленное при изменении скорости вращения планеты, привело к выводу, что основные особенности ОЦА на различных планетах могут быть объяснены различием их скоростей вращения. Так, например, замедление периода вращения до 117 сут, соответствующего условиям Венеры, приводит к двум последствиям: к сильному уменьшению силы Кориолиса и к значительному усилению (за счет медленности вращения) влияния суточного хода инсоляции на формирование локальных очагов нагревания и выхолаживания. Все это обуславливает размытие характерных для Земли циклонов и антициклонов, сужение струйного течения умеренных широт, сдвиг его к полюсам и диссипацию, распространение ячейки Гадлея на всю планету и формирование интенсивной зональной (четырёхсуточной) циркуляции в верхней атмосфере, типичной для Венеры. Сокращение периода вращения до 10 ч (аналогия с Юпитером), усиливая воздействие силы Кориолиса, вызывает образование характерной для Юпитера системы перемещающихся полос сильного зонального ветра.

Вильямс и Холлоуэй [218] проанализировали изменчивость атмосферной циркуляции на землеподобной планете, обусловленную вариациями скорости вращения $\Omega^* = \Omega/\Omega_E$ ($\Omega_E = 7,292 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ — современная угловая скорость вращения Земли) и угла наклона оси вращения планеты θ_r . Используемая с целью численного эксперимента модель общей циркуляции атмосферы реализована при фиксированных среднегодовых распределениях альбедо поверхности планеты, количества облаков, содержания озона и углекислого газа в зависимости от широты и высоты, тогда как содержание водяного пара предвычисляется (эти данные необходимы для расчета радиационного притока тепла). Задана плоская, однородно увлажненная (болотообразная) поверхность с нулевой теплоемкостью, причем исключены процессы ледообразования. Мелкомасштабная конвекция параметризована в приближении влажноадиабатического приспособления.

Варьирование Ω^* в пределах 0—8 обуславливает формирование зональных струйных течений разнообразной формы и масштаба, которые циркумглобальны и постоянны по форме (при фиксированном Ω^*), за исключением очень малых значений $\Omega^* < 1/64$. Повышенная скорость вращения вызывает сужение тропического струйного течения и увеличение числа внетропических струйных течений, зональность которых усиливается. Основные особенности меридиональной циркуляции состоят в наличии прямой ячейки Гадлея, смещенной к экватору от ядра тропического струйного течения, и более слабой обратной ячейки на полярной стороне ядра.

При малых $\Omega^* \leq 1/4$ бароклинные вихри перестают существовать и ячейка Гадлея охватывает все полушарие. Разность температур экватор—полюс в основном увеличивается с ростом скорости вращения, но при $\Omega^* = 3/4$ имеет место вторичный минимум, отображающий максимум эффективности бароклинных вихрей:

Ω^*	0	1/8	3/4	1	2	4	8
$T_{S \text{ экв}}$	292	300	300	305	305	305	310
$T_{S \text{ полюс}}$	280	255	275	270	265	235	230
ΔT_S	12	45	25	35	40	70	80

В период солнцестояния планета с наклоном оси вращения, равным 10° , и земной скоростью вращения характеризуется слабой широтной зависимостью температуры и циркуляции в летнем полушарии, но при возрастании наклона до 20° и более инсоляция летнего полюса максимальна, что приводит к формированию сильного меридионального градиента температуры, интенсивного восточного переноса (скорость ветра в стратосфере до 180 м/с) и вихрей в летнем полушарии. Суточный ход солнечно-обусловленного нагрева играет важную роль в формировании ОЦА лишь при малых $\Omega^* \leq 1/16$, приводя к трансформации узких полярных струйных течений в единый обширный поток, охватывающий большую часть полушария.

Наличие на Земле «гибрида» тропических и внетропических струйных течений при $\Omega^* = 1$ определяет наиболее сложную ОЦА на этой планете, но вследствие тепловой инерции океанов и полярных льдов годового хода температуры менее выражен, чем это характерно для планеты с таким углом наклона оси вращения. Высокие полярные температуры и сильные восточные потоки реализуются лишь в стратосфере летнего полушария. Наклон оси мог более сильно влиять в безледниковый период эволюции Земли, когда Ω^* и θ_p , по-видимому, вдвое превосходили современные значения.

Несмотря на различие масс и состава атмосфер Земли и Марса, ОЦА этих планет сходны. Отсутствие на Марсе океанов определяет, однако, формирование более сильного годового хода температуры. На Венере ОЦА соответствует условиям земледобной

планеты при малой скорости вращения и существенном проявлении воздействия дневного хода нагревания. Последний «управляет» квазигоризонтальным турбулентным обменом, обуславливающим формирование зонального ветра. Не связанный с суточным ходом компонент нагревания ответствен за меридиональный обмен, определяющий амплитуду зонального ветра.

Для ОЦА на Юпитере и земледобной планете с $\Omega^* = 4$ типично мощное тропическое струйное течение, многочисленные, глубоко зональные, внетропические течения и вихри. При этом тропические течения невозможны при отсутствии подслоя, у которого возникает касательное ветровое напряжение или обмен моментом количества движения. Неоднородности подслоя могут порождать стабильные антициклонические вихри, подобные Большому Красному Пятну. Сходные условия имеют место и на других планетах-гигантах, хотя экваториальная циркуляция на Сатурне существенно отличается от юпитерианской (возможно, за счет специфики годового хода). Сатурн ближе к земледобной планете с $\Omega^* = 8$. Большой наклон оси вращения Урана и отсутствие внутреннего источника тепла определяют неизбежность формирования теплого полярного пятна, а также сильных восточных ветров и вихрей в летнем полушарии этой планеты.

Красс [137] рассмотрел некоторые аспекты космической гляциологии, связанные с получением новых оценок количества воды на Земле, Марсе и галилеевых спутниках Юпитера. Значительная часть воды в пределах Солнечной системы сосредоточена на спутниках Юпитера в форме льда на поверхности и во внутренних частях этих спутников, а также на Земле и Марсе. Марсианский лед сконцентрирован в слое вечной мерзлоты, средняя толщина которого составляет около 3 км. Под зоной вечной мерзлоты может существовать жидкая вода. Полярные шапки Марса содержат лишь около 1 % воды, имеющейся на планете (в ледниках Земли сосредоточено примерно 90 % пресной воды). Лед составляет примерно 5 % объема юпитерианского спутника Европа, а в случае Ганимеда и Каллисто эта доля превосходит одну треть.

Для Европы Красс [137] предложил модель ледяной коры толщиной 25—30 км, «плавающей» на мантии из жидкой воды толщиной 60—80 км. На основе использования модели нелинейной термоупругости показано, что при определенных условиях подобная кора может подвергаться разрушению вследствие возникновения радиальной колебательной неустойчивости. Это подтверждается наличием на поверхности Европы многочисленных трещин и разрывов.

В работе [137] проанализировано воздействие короткопериодных изменений температуры поверхности Европы на формирование рельефа местности. По-видимому, практически вся вода на Ганимеде и Каллисто существует в форме льда: диссипация при-

ливной энергии не обеспечивает выделения тепла, достаточного для таяния льда.

Необходимы дальнейшие исследования с целью разработки: 1) новых реологических моделей с учетом свойств льда при низкой температуре и зависимости от температуры; 2) моделей термомеханики льда, пригодных для описания динамики поверхностей небесных тел, покрытых льдом. Важное значение имеют исследования свойств «льдов» других веществ и их взаимодействия с водным льдом. Несомненно, изучение льда на других планетах окажется плодотворным для более глубокого понимания закономерностей динамики ледяного покрова на Земле.

6.3. Диссипация атмосферы

Наблюдаемая в настоящее время исключительная сухость на Венере побудила многих исследователей предположить возможность существования на этой планете в прошлом большого количества воды, которая была впоследствии потеряна в результате фотодиссоциации водяного пара в верхней атмосфере, последующей диссипации водорода, а также реакций в атмосфере и твердой оболочке. Подобное предположение подтверждается обнаруженной недавними измерениями повышенной концентрацией дейтерия в венерианской атмосфере. Отношение концентрации D/H в облаках Венеры достигает $(1,6 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$, что примерно в 100 раз превосходит D/H в облаках Земли ($1,56 \cdot 10^{-4}$). Если предположить, что первоначальные значения D/H на обеих планетах были одинаковыми, то следует считать, что первоначальное содержание воды на Венере по крайней мере в 100 раз превосходило современное.

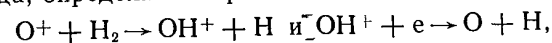
Наблюдаемое сейчас объемное отношение смеси H_2O в нижних слоях атмосферы Венеры составляет около 10^{-4} , что эквивалентно глобальной массе водяного пара $2 \cdot 10^{19}$ г, или около 0,0014 % массы земного океана. Таким образом, первоначальное содержание воды на Венере было не меньше 0,14 % земного. Кастинг и Поллак [118] предприняли расчеты возможной эволюции венерианской атмосферы в рамках одномерной фотохимическо-динамической модели с целью изучения гидродинамически обусловленной диссипации водорода из первоначальной атмосферы с высоким содержанием водяного пара. Поток диссипирующего водорода определен как функция отношения смеси H_2O на уровне холодной «ловушки» водяного пара, относительно которой предполагается, что она находится на уровне минимального насыщающего отношения смеси при температуре 170 К (в настоящее время этот уровень находится на высоте около 90 км, а при более высоком влагосодержании мог подыматься примерно до 30 км). Отношение смеси H_2O на уровне ловушки приближенно выражено через содержание водяного пара в нижних слоях атмосферы.

Анализ результатов численного моделирования показал, что процесс гидродинамической диссипации играет доминирующую

роль в потере водорода, если отношение смеси H_2O в нижней атмосфере превосходит 0,1. При этом скорость диссипации зависит от величины потока УФ солнечной радиации и эффективности нагревания атмосферы за счет поглощения УФ радиации, а также (в меньшей степени) от содержания O_2 в атмосфере. Оценка интервала времени, в течение которого Венера могла потерять количество воды, эквивалентное массе земного океана (это соответствует парциальному давлению водяного пара у поверхности Венеры около $265 \cdot 10^5$ Па), дала значение примерно 1 млрд лет.

Одновременно с водородом подвергается диссипации и дейтерий (если скорость диссипации достаточно высока), но при замедлении диссипации начинается возрастание отношения концентраций D/H. Поскольку рассмотренные результаты расчетов являются сугубо приближенными, не исключено, что на Венере всегда имел место дефицит H_2O . Важным критерием правильности гипотезы о высоком содержании воды на Венере в геологическом прошлом мог бы стать химический анализ степени окисленности верхней толщи твердой оболочки Венеры: потеря массы воды, эквивалентной массе земного океана, должна привести к выделению количества O_2 , достаточного для окисления FeO до Fe_2O_3 в верхней толще оболочки глубиной несколько десятков километров. Важное значение имеют и поиски следов водной эрозии поверхности планеты.

Паризо и Морельс [152] предложили предварительную фотохимическую модель верхней атмосферы Венеры (высота 60—200 км), которой соответствует отношение смеси молекулярного водорода, равное примерно 10 млн^{-1} . Значение диссипации атомов водорода, определяемой реакциями



имеет в этом случае порядок $10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Рассматриваемая концентрация водорода в экзосфере согласуется с значением коэффициента диффузии около $5 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{с}$.

Одно из наиболее существенных различий между Землей и Венерой состоит в почти полном отсутствии на Венере воды. В табл. 6.5 приведены значения относительного содержания летучих компонентов на Земле, Венере и Марсе (г компонента/г массы планеты). Данные таблицы свидетельствуют о том, что содержание H_2O сильно различается на Земле и Венере, но содержание CO_2 и N_2 на этих планетах примерно одинаково.

Различные соображения о потере Венерой воды весьма гипотетичны, однако несомненно, что отношение концентраций D/H на Венере в 100 раз больше, чем на Земле. Из этого факта следует, что Венера должна была потерять 99 % H или больше, если одновременно происходила диссипация D. В связи с этим Кумар и др. [139] проанализировали три возможных механизма нетепловой диссипации водорода и дейтерия из атмосферы Венеры

Таблица 6.5

Массовая доля летучих компонентов на Земле, Венере и Марсе

Компонент	Венера	Земля	Марс
Ar	$6,0 \cdot 10^{-10} \dots 9,0 \cdot 10^{-9}$	$4,6 \cdot 10^{-11}$	$(1,9 \dots 2,5) \cdot 10^{-3}$
N ₂	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$(0,4 \dots 4,0) \cdot 10^{-7}$
CO ₂	$9,5 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-8}$
H ₂ O	$1,0 \cdot 10^{-9} \dots 1,0 \cdot 10^{-8}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$
D/H	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	

в настоящее время и в прошлом (наличие «нетеплового» водорода в настоящее время доказано данными наблюдений): 1) зарядовый обмен плазматического H⁺ с экзосферным; 2) воздействие «горячих» атомов O в экзосфере на H; 3) ионно-молекулярные реакции с участием O⁺ и H₂.

В прошлом должен был доминировать первый из упомянутых механизмов, поскольку содержание H было более высоким; в этом случае поток диссипирующих атомов водорода быстро возрастает с увеличением содержания H в верхней атмосфере. Концентрация H достигает уровня насыщения при потоке $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, сосредоточенном на дневной стороне планеты, где отношение смеси на уровне гомопаузы составляет около $2 \cdot 10^{-3}$, что соответствует отношению смеси H₂O примерно $1 \cdot 10^{-3}$ у холодной ловушки и примерно 15 % у поверхности Венеры.

Диссипация дейтерия может происходить за счет механизма зарядового обмена, причем возможно достижение уровня обогащения D/H около 1000 на протяжении всего периода преобладающего вклада механизма зарядового обмена, который, по-видимому, продолжался в течение последних 3 млрд лет. Так же, как и на Земле, на Венере при достижении уровня насыщения возникает гидродинамический поток атомов водорода, обеспечивающий дальнейшее эффективное развитие диссипации. Поэтому вполне вероятно, что за время геологической эволюции Венера потеряла количество воды, эквивалентное земному океану. Если это действительно произошло, то либо обогащение D/H поддерживалось на низком уровне за счет умеренно интенсивной дегазации ювенильных вод, либо эволюция началась при значении D/H примерно $4,0 \cdot 10^{-6}$. Процесс эволюции D/H требует, однако, дальнейших серьезных исследований.

Усиленное внимание к проблеме потери воды Венерой стимулировало обнаружение 100-кратного обогащения дейтерием по отношению к водороду в венерианских облаках. Одна из предложенных в связи с этим гипотез исходила из того, что в процессе эволюции нижней атмосферы Венеры сформировался «разгоняющийся» парниковый эффект (РПЭ), когда вся вода находится в атмосфере в форме водяного пара или облаков. Подобная ситуация

возможна, если внеатмосферная инсоляция (солнечная постоянная — СП) превосходит определенный критический уровень. В условиях атмосферы, состоящей из водяного пара, при 50 %-ном количестве облаков этот критический уровень располагается в интервале $(1,4-2,0) S_{\odot}$ ($S_{\odot} = 1360 \text{ Вт/м}^2$ — современное значение СП) в зависимости от относительной влажности.

В настоящее время СП для Венеры равна $1,91 S_{\odot}$, но 4,5 млрд лет назад составляла $1,34 S_{\odot}$ (с учетом 30 %-ного увеличения СП за время эволюции Солнечной системы). Таким образом, в период формирования Венеры она находилась в субкритическом состоянии по отношению к условиям РПЭ, который мог возникнуть позднее. С целью проверки обоснованности гипотезы РПЭ Кастинг и др. [119] сделали вычисления эволюции вертикальных профилей температуры и влажности в атмосфере, подобной земной, с учетом постоянного возрастания СП.

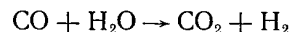
Численное моделирование осуществлено с использованием одномерной радиационно-конвективной модели. Предполагается, что в тропосфере, насыщенном водяным паром, имеет место влажноадиабатический вертикальный градиент температуры при фиксированных условиях облачности. Расчеты показали, что по мере роста СП от $0,81$ до $1,45 S_{\odot}$ происходило увеличение среднеглобальной температуры поверхности от -1 до 111°C . При этом температура поверхности, соответствующая высокому значению СП, может оказаться заниженной вследствие пренебрежения вкладом континуального поглощения водяным паром вне окна прозрачности $8-12 \text{ мкм}$ в парниковый эффект. Предположение о влажноадиабатическом градиенте в тропосфере может объяснить замедление роста температуры поверхности, но не исключает развитие РПЭ.

Полученные в работе [119] результаты свидетельствуют о том, что температура поверхности Венеры в период ее первоначальной эволюции, когда на планете было много воды, достигала по крайней мере $80-100^{\circ}\text{C}$, но могла быть и значительно выше. Неопределенность выявления возможности формирования РПЭ и существования жидкой воды на венерианской поверхности определяется плохой изученностью континуального поглощения водяным паром (оно вносит главный вклад в формирование парникового эффекта при температуре выше $40-50^{\circ}\text{C}$) и ненадежностью сведений об изменчивости относительной влажности и облачности. Однако даже при отсутствии РПЭ, Венера могла потерять воду в размере, эквивалентном земному Мировому океану, за несколько сотен миллионов лет.

Независимо от упомянутых неопределенностей водяной пар должен был быть главным компонентом атмосферы на всех высотах, и определять благоприятные условия для быстрого гидродинамической диссипации водорода. Оставшийся при этом кислород был, по-видимому, израсходован в результате химических реак-

ций окисления минералов твердой оболочки планеты. Как потеря кислорода, так и наблюдаемое в настоящее время обогащение дейтерием по отношению к водороду естественное всего объясняются, если предположить существование на первоначальном этапе эволюции Венеры океанов жидкой воды. Поиски следов наличия на Венере жидкой воды в прошлом должны быть одной из главных целей картирования поверхности планеты в будущем.

Полученное по данным АМС «Венера» и «Пионер—Венера» влагосодержание атмосферы Венеры оказалось на 4—5 порядков меньше, чем влагосодержание атмосферы Земли. Как отметили Ричардсон и др. [169], это можно объяснить двумя причинами: 1) более низким содержанием воды в материалах, из которых происходила аккреция Венеры, поскольку эти материалы относились к сравнительно горячей части протосолнечной туманности; 2) сильной потерей воды Венерой в ходе ее эволюции. Обнаружение 100-кратного обогащения венерианских облаков дейтерием указывает на существование в прошлом большого количества воды на Венере. В связи с этим [169] предложена равновесная термодинамическая модель гетерогенной системы $C-O-H-N-S$ с изменяющимся отношением концентраций C/H (от земного значения 0,033 и выше), из которой следует, что при возрастании C/H происходит уменьшение влагосодержания, но для объяснения низкого влагосодержания только первоначальным дефицитом воды требуется неприемлемо высокое C/H . Возрастание C/H сопровождается, однако, быстрым ростом CO/H_2O , благоприятствующим потере воды за счет реакции



или реакции CO и O_2 , возникающим при фотодиссоциации водяного пара. По-видимому, этот механизм потери воды был на Венере главным.

В связи с изучением проблемы эволюции венерианской атмосферы Паризо и Зуккони [153] сделали расчеты коэффициентов фотодиссоциации CO_2 , SO_2 , HCl и H_2O при различной температуре, из которых вытекает необходимость принимать во внимание температурную зависимость поперечников фотодиссоциации CO_2 как главного оптически активного компонента атмосфер Марса и Венеры, ответственного за ослабление солнечной радиации (в венерианской атмосфере существенный вклад в ослабление вносит также сернистый газ). Учет температурной зависимости фотолиза CO_2 в мезосфере Венеры приводит к ослаблению образования атмосферного кислорода примерно на 15 % и повышению прозрачности атмосферы в области длин волн больше 160 нм.

Молекулярный кислород является одним из малых компонентов, который должен присутствовать в почти углекислотной планетарной атмосфере как продукт фотохимических процессов (фотолиза CO_2), и поэтому его обнаружение (наряду с CO , O , OH , Cl) важно с точки зрения анализа детальных особенностей фото-

химических процессов. Наличие O_2 в толще атмосферы над облачным покровом Венеры было выявлено ранее лишь по 1,27-мкм излучению, но количественные данные получить не удалось, тогда как результаты прямых измерений в АМС «Пионер—Венера» относятся к слою облачного покрова (отношения смеси O_2/CO_2 , равные $(4,4 \pm 2,5) \cdot 10^{-5}$ и $(1,6 \pm 0,7) \cdot 10^{-5}$ на высотах 52 и 42 км соответственно) и не могут быть использованы для экстраполяции вверх из-за плохой изученности реакций образования O_2 . Инфракрасное свечение явилось источником информации о молекулярном кислороде и на Марсе.

По данным о спектрах Марса и Венеры в линиях $Q(9)$ и $P(9)$ ветви P полосы молекулярного кислорода (центры линий 0,76351869 и 0,76363169 мкм), зарегистрированным при помощи трех интерферометров Фабри—Перо на 2,5-метровом телескопе обсерватории Маунт-Вильсон, Трагер и Лунин [209] осуществили спектроскопический поиск O_2 . Наблюдения, сделанные ранней весной 1982 г., привели к верхнему пределу осредненного отношения смеси O_2/CO_2 для толщ атмосферы над облачным покровом Венеры, равному $3 \cdot 10^{-7}$. В этот же период общее содержание O_2 в марсианской атмосфере составило 8,5 атм-см, что несколько меньше содержания O , полученного 10 лет назад. В работе [209] подчеркнута важность одновременных наблюдений отношений смеси O_2/CO и O_2/CO_2 .

Дальнейшие комплексные исследования химического состава атмосферы Венеры имеют принципиально важное значение для углубления понимания закономерностей диссипации и эволюции венерианской атмосферы.

Список литературы

К главам 1, 2

1. Абалакин В. К. Новая система астрономических постоянных Международного астрономического союза 1976, 1979 гг.—Кометный циркуляр, 11 мая 1980, № 261, с. 1—3.
2. Авдеевский В. С., Годиев А. Г., Захаров Ю. В. и др. Оценка физико-механических характеристик грунта Венеры по измерениям ударных перегрузок при посадке АМС «Венера-13» и «Венера-14».—Косм. исслед., 1983, т. 21, № 3, с. 331—339.
3. Александров Ю. Н., Вышков А. С., Дубровин В. М. и др. Радиолокационные наблюдения Марса, Венеры и Меркурия на волне 39 см в 1980 г.—Доклады АН СССР, 1980, т. 255, № 6, с. 1334—1338.
4. Аллен К. У. Астрофизические величины.—М.: Мир, 1977, 446 с.
5. Базилевский А. Т., Иванов Б. А., Крючков В. П. и др. Ударные кратеры Венеры по данным радиолокационных изображений КА «Венера-15» и «Венера-16».—Доклады АН СССР, 1985, т. 282, № 3, с. 671—674.
6. Барсуков В. Л., Базилевский А. Т., Кузьмин Р. О. и др. Основные типы структур северного полушария Венеры.—Астроном. вестник, 1985, т. 19, № 1, с. 3—14.
7. Барсуков В. Л., Сурков Ю. А., Москалева Л. П. и др. Геохимические исследования поверхности Венеры АМС «Венера-13» и «Венера-14».—Геохимия, 1982, № 7, с. 899—920.
8. Барсуков В. Л., Базилевский А. Т., Кузьмин Р. О. и др. Геология Венеры по результатам анализа радиолокационных изображений, полученных АМС «Венера-15» и «Венера-16» (Предварительные данные).—Геохимия, 1984, № 12, с. 1811—1820.
9. Барсуков В. Л., Базилевский А. Т., Пронин А. А. и др. Первые результаты геолого-морфологического анализа радиолокационных изображений поверхности Венеры, полученных АМС «Венера-15» и «Венера-16».—Доклады АН СССР, 1984, т. 279, № 4, с. 946—950.
10. Башмачников М. В., Гусляков В. Т., Ежиков В. М. и др. Характеристики поверхности Венеры, измеренные радиовысотометром в районе посадки спускаемого аппарата «Венера-8».—Косм. исслед., 1976, т. 14, № 1, с. 111—114.
11. Бердж Г. Л. Интерферометрические наблюдения Венеры с высоким разрешением на длине волны 3,1 см.—В кн.: Физика Луны и планет. М.: Наука, 1972, с. 355—358.
12. Богомолов А. Ф., Назаркин В. А., Еремеев В. И. и др. Предварительные данные по радиометрическому исследованию поверхностного слоя северного полушария планеты Венера орбитальными станциями «Венера-15» и «Венера-16».—Астроном. циркуляр, 1984, № 1333, 25 июня, с. 3—4.
13. Богомолов А. Ф., Скрыпник Г. И., Бокштейн И. М. и др. Обработка данных полосовой съемки поверхности Венеры, переданных станциями «Венера-15» и «Венера-16».—Косм. исслед., 1985, т. 23, № 2, с. 179—190.
14. Башаринов А. Е., Ветухновская Ю. Н., Кузьмин А. Д. и др. Измерения яркостной температуры освещенной стороны Венеры на волне 8 мм.—Астроном. журн., 1964, т. 41, № 4, с. 707—710.
15. Ветухновская Ю. Н., Кузьмин А. Д., Наумов А. П. и др. Определение параметров атмосферы Венеры на уровне средней поверхности по радиоастрономическим и радиолокационным измерениям.—Астроном. журн., 1971, т. 48, № 1, с. 146—156.
16. Ветухновская Ю. Н., Кузьмин А. Д., Лосовский Б. Я. Измерения фазового хода радиоизлучения Венеры на волне 8,2 мм.—Астроном. журн., 1971, т. 48, № 5, с. 1033—1037.
17. Воронов В. Н., Кисляков А. Г., Троицкий А. В. Яркостные температуры Венеры, Сатурна и Меркурия на волне 3,87 мм.—Астроном. вестник, 1974, т. 8, № 1, с. 17—19.
18. Геткин Ю. М., Панфилов А. С. Статистика контрастов и особенности рельефа местности на панорамах поверхности Венеры.—Косм. исслед., 1978, т. 16, № 4, с. 557—562.
19. Гольнев В. Я., Парийский Ю. Н., Фридман П. А. и др. Распределение радиояркостности по диску Венеры на волне 8 мм.—В кн.: Физика Луны и планет. М.: Наука, 1972, с. 348—352.
20. Головков В. К., Кузнецов Б. И., Петров Г. М. и др. О структуре отдельных областей Венеры и о периоде ее вращения по радиолокационным наблюдениям на волне 39 см в 1972 г.—В кн.: Проблемы астрономии и геодезии. Труды VI съезда ВАГО. Ереван, 1975. М.: Наука, 1976, с. 61—76.
21. Головков В. К., Кузнецов Б. И., Петров Г. М. и др. Исследование рельефа экваториальной части поверхности Венеры по радиолокационным наблюдениям в СССР.—Радиотехника и электроника, 1976, т. 21, № 9, с. 1801—1807.
22. Головков В. К. Определение элементов вращения Венеры и координат областей поверхности с повышенной отражательной способностью в радиодиапазоне.—В кн.: Физика Луны и планет. М.: Наука, 1972, с. 314—319.
23. Ефанов В. А., Кисляков А. Г., Моисеев И. Г. и др. Наблюдение Юпитера, Венеры и источника ЗС 273 на волнах 2 и 8 мм.—Изв. вузов. Радиофизика, 1970, т. 13, № 2, с. 219—224.
24. Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет.—М.: Наука, 1978, 192 с.
25. Зинченко И. И., Кисляков А. Г., Воронов В. Н. Наблюдения Меркурия, Венеры, Марса, Юпитера, Сатурна и Урана на волне 3,92 мм.—Изв. вузов. Радиофизика, 1975, т. 18, № 4, с. 501—505.
26. Кемурджян А. Л., Бродский П. Н., Громов В. П. и др. Предварительные результаты определения физико-механических свойств грунта Венеры на советских автоматических станциях «Венера-13» и «Венера-14».—Косм. исслед., 1983, т. 21, № 3, с. 323—330.
27. Кисляков А. Г., Кузьмин А. Д., Саломонович А. Е. Радиоизлучение Венеры на волне 4 мм.—Астроном. журн., 1962, т. 39, № 3, с. 410—417.
28. Колосов М. А., Арманд Н. А., Яковлев О. И. Распространение радиоволн при космической связи.—М.: Связь, 1969, 155 с.
29. Колосов М. А., Яковлев О. И., Павельев А. Г. и др. Бистатическая радиолокация Венеры при помощи спутников «Венера-9» и «Венера-10».—Радиотехника и электроника, 1976, т. 21, № 9, с. 1808—1815.
30. Кондратьев К. Я. Метеорология планет.—Л.: Изд-во ЛГУ, 1977, 294 с.
31. Кондратьев К. Я., Москаленко Н. И. Тепловое излучение планет.—Л.: Гидрометеиздат, 1977, 263 с.
32. Корольков Д. В., Парийский Ю. Н., Тимофеева Г. М. и др. Радиоастрономические наблюдения Венеры с высокой разрешающей способностью.—Доклады АН СССР, 1963, т. 149, № 1, с. 65—67.
33. Космические исследования, выполненные в СССР в 1981 г.—М.: Наука, 1982, 48 с.
34. Космические исследования, выполненные в СССР в 1982, 1983 годах.—М., ИКИ АН СССР, 1984, 118 с.
35. Котельников В. А., Дубровин В. М., Кислик М. Д. и др. Радиолокационные наблюдения Венеры.—Доклады АН СССР, 1962, т. 145, № 5, с. 1035—1038.
36. Котельников В. А., Дубровин В. М., Морозов В. А. и др. Результаты радиолокации Венеры в 1961 г.—Радиотехника и электроника, 1962, т. 7, № 11, с. 1860—1872.

37. Котельников В. А., Дубровин В. М., Дубинский Б. А. и др. Радиолокационные наблюдения Венеры в Советском Союзе в 1962 г.— Доклады АН СССР, 1963, т. 151, № 3, с. 532—535.
38. Котельников В. А., Дубинский Б. А., Кислик М. Д. и др. Уточнение астрономической единицы по результатам радиолокации планеты Венеры в 1961 г.— В кн.: Искусственные спутники Земли. Вып. 17. М.: Изд-во АН СССР, 1963, с. 101—106.
39. Котельников В. А., Александров Ю. А., Апраксин Л. В. и др. Радиолокационные наблюдения Венеры в Советском Союзе в 1964 г.— Доклады АН СССР, 1965, т. 163, № 1, с. 50—53.
40. Крупенин Н. Н., Наумов А. П. К интерпретации радиолокационных измерений Венеры в микроволновом диапазоне радиоволн.— В кн.: Физика Луны и планет. М.: Наука, 1972, с. 365—367.
41. Крупенин Н. Н. Оценка плотности вещества поверхностных слоев Луны, Марса и Венеры.— М., 1975. Препринт ИКИ АН СССР № 212, 45 с.
42. Крупенин Н. Н. Исследование Луны и планет радиофизическими методами.— В кн.: успехи Советского Союза в исследовании космического пространства. Второе космическое десятилетие 1967—1977. М.: Наука, 1978, с. 381—405.
43. Крупенин Н. Н. Радиофизические исследования планет.— М.: Наука, 1978, 183 с.
44. Крупенин Н. Н. Радиоисследования Луны и планет земной группы.— Итоги науки и техники. Астрономия, т. 17, М., ВИНТИ, 1981, 167 с.
45. Крупенин Н. Н. Сравнительная оценка неровностей Луны и Венеры.— Косм. исслед., 1972, т. 10, № 4, с. 279—285.
46. Крючков В. В., Пронин А. А. Экзогенные процессы и шероховатость поверхности Венеры по радиолокационным наблюдениям.— Косм. исслед., 1985, т. 23, № 2, с. 268—275.
47. Ксанфомалити Л. В. Поиск микросейсм на Венере.— Косм. исслед., 1983, т. 21, № 3, с. 355—360.
48. Кузьмин А. Д., Маров М. Я. Физика планеты Венеры.— М.: Наука, 1974, 408 с.
49. Кузьмин А. Д., Саломонович А. Е. Наблюдения радиоизлучения Венеры и Юпитера на волне 8 мм.— Астроном. журн., 1962, т. 39, № 4, с. 660—668.
50. Кузьмин А. Д., Кларк Б. Дж. Измерения поляризации и распределения яркостной температуры Венеры на волне 10,6 см.— Астроном. журн., 1965, т. 42, № 3, с. 551—553.
51. Кузьмин А. Д. Измерения яркостной температуры освещенной стороны Венеры на волне 10,6 см.— Астроном. журн., 1965, т. 42, № 6, с. 1281—1286.
52. Кузьмин А. Д., Дент У. Измерения яркостной температуры и поляризации радиоизлучения Венеры на волне 3,75 см.— Астроном. журн., 1966, т. 43, № 3, с. 692—694.
53. Кузьмин А. Д. Радиофизические исследования Венеры.— Итоги науки. Физика. Радиофизика 1965—1966 г. М., ВИНТИ, 1967, 176 с.
54. Кучерявенков А. И., Яковлев О. И., Павельев А. Г. и др. Рельеф Венеры по результатам бистатической радиолокации с помощью спутников «Венера-9» и «Венера-10».— Косм. исслед., 1976, т. 14, № 5, с. 693—696.
55. Кучерявенков А. И., Яковлев О. И., Павельев А. Г. и др. Коэффициент отражения, рефракция и ослабление радиоволн в атмосфере Венеры по данным бистатической радиолокации.— В кн.: Тезисы докладов XII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. Ч. 1. М.: Наука, 1978, с. 244—246.
56. Кучерявенков А. И., Милехин О. Е., Павельев А. Г. и др. Результаты исследования поверхности 5 районов Венеры методом бистатической радиолокации.— Косм. исслед., 1984, т. 22, № 6, с. 895—905.
57. Майер К. Тепловое радиоизлучение Луны и планет.— В кн.: Планеты и спутники/Под ред. А. Дольфуса. М.: Мир, 1974, с. 205—266.
58. Международный проект «Венера—Галлея». Вега. Спускаемый аппарат. М., ИКИ АН СССР, 1985, 21 с.
59. Милехин О. Е., Кучерявенков А. И., Павельев А. Г. и др. Шероховатость поверхности Венеры по данным бистатической радиолокации.— Косм. исслед., 1983, т. 21, № 6, с. 921—928.
60. Мошкин Б. Е., Экономов А. П., Головин Ю. Н. Пыль на поверхности Венеры.— Косм. исслед., 1976, т. 17, № 2, с. 280—285.
61. Непоклонов Б. В., Лейкин Г. А., Селиванов А. С. и др. Обработка и топографическая интерпретация телевизионных панорам, полученных с посадочных аппаратов АМС «Венера-9» и «Венера-10».— В кн.: Первые панорамы поверхности Венеры. М.: Наука, 1979, с. 80—106.
62. Освоение космического пространства в СССР в 1957—1967 гг./Под ред. Г. А. Скуридина.— М.: Наука, 1967, 555 с.
63. Павельев А. Г., Колосов М. А., Яковлев О. И. и др. Об исследовании Венеры методом бистатической радиолокации.— Радиотехника и электроника, 1978, т. 23, № 10, с. 2017—2026.
64. Павельев А. Г., Стрелков Г. М. О распределении радиояркостной температуры по диску Венеры.— Косм. исслед., 1967, т. 5, № 2, с. 265—275.
65. Павельев А. Г., Кучерявенков А. И. Влияние рефракции в атмосфере на распределение энергии отраженного сигнала на поверхности Венеры.— Радиотехника и электроника, 1980, т. 25, № 6, с. 1143—1152.
66. Селиванов А. С., Панфилов А. С., Нараева М. К. и др. Фотометрическая обработка панорам поверхности Венеры.— В кн.: Первые панорамы поверхности Венеры. М.: Наука, 1979, с. 68—79.
67. Селиванов А. С., Аваткова Н. А., Бокштейн И. М. и др. Первые цветные панорамы поверхности Венеры, переданные АМС «Венера-13, -14».— Косм. исслед., 1983, т. 21, № 2, с. 183—189.
68. Селиванов А. С., Аваткова Н. А., Бокштейн И. М. и др. Продолжение телевизионного исследования поверхности Венеры со спускаемых аппаратов.— Косм. исслед., 1983, т. 21, № 2, с. 176—182.
69. Селиванов А. С., Гектин Ю. М., Нараева М. К. и др. О динамических явлениях, зарегистрированных на панорамах поверхности Венеры, переданных АМС «Венера-13, -14».— Косм. исслед., 1983, т. 21, № 2, с. 190—195.
70. Стрелков Г. М. Излучение и отражательная способность Венеры на дециметровых волнах.— Астроном. вестник, 1968, т. 2, № 1, с. 19—24.
71. Сурков Ю. А., Москалева Л. П., Щеглов О. П. и др. Элементный состав пород на Венере.— Косм. исслед., 1983, т. 21, № 2, с. 308—319.
72. Сурков Ю. А., Москалева Л. П., Щеглов О. П. и др. Метод и аппаратура для анализа пород, применявшаяся на АМС «Венера-13» и «Венера-14».— Косм. исслед., 1983, т. 22, № 2, с. 320—328.
- 72а. Сурков Ю. А., Кирмозов Ф. Ф., Соборнов О. П. и др. Содержание урана, тория и калия в породах Венеры в районах посадки АМС «Вега-1» и «Вега-2».— Письма в Астроном. журн., 1986, т. 12, № 2, с. 114—119.
73. Троицкий В. С. К теории радиоизлучения Венеры и Марса.— Изв. вузов. Радиофизика, 1964, т. 7, № 2, с. 208—214.
74. Усиков А. Я., Корниенко Ю. В., Шкуратов Ю. Г. и др. Анализ связи высоты и шероховатости на Венере по данным радиолокации с КА «Пионер—Венера».— Доклады АН СССР, 1982, т. 264, № 3, с. 391—393.
75. Флоренский К. П., Базилевский А. Т., Пронин А. А. и др. Результаты геолого-морфологического анализа панорамы Венеры.— В кн.: Первые панорамы поверхности Венеры. М.: Наука, 1979, с. 107—127.
76. Флоренский К. П., Базилевский А. Т., Крючков В. П. и др. Анализ панорам места посадки «Венера-13» и «Венера-14».— Письма в Астроном. журн., 1982, т. 8, № 7, с. 429—432.
77. Флоренский К. П., Базилевский А. Т., Крючков В. П. и др. Геолого-морфологический анализ панорам «Венеры-13» и «Венеры-14».— Косм. исслед., 1982, т. 21, № 3, с. 340—350.
78. Флоренский К. П., Николаева О. В., Волкова В. П. и др.

- Об окислительно-восстановительных условиях на поверхности Венеры по данным геохимического индикатора «Контраст» на станциях «Венера-13» и «Венера-14». — Косм. исслед., 1983, т. 21, № 3, с. 351—354.
79. Эванс Дж., Хэгфорс Т., Ингалс Р. П. и др. Радиолокационные наблюдения Венеры на волне 3,8 см. — В кн.: Физика Луны и планет. М.: Наука, 1972, с. 289—308.
 80. Яковлев О. И. Распространение радиоволн в Солнечной системе. — М.: Сов. радио, 1974. 192 с.
 81. Anderson J. D., Cain D. L., Efron L. et al. The radius of Venus as determined by planetary radar and Mariner 4 tracking data. — J. Atmos. Sci., 1968, v. 25, N 6, p. 1171—1173.
 82. Ash M. E., Campbell D. B., Dyce R. P. et al. The case for the radar radius of Venus. — Science, 1968, v. 160, N 3831, p. 985—987.
 83. Beckman P., Klemperer W. K. Interpretation of the angular dependence of backscattering from the Moon and Venus. — J. Res. NBS (Radio Science), 1965, v. 69 D, N 12, 1669—1677.
 84. Berge G. L., Muhleman D. O., Orton G. S. High resolution interferometric observations of Venus at three radio wavelength. — Icarus, 1972, v. 17, N 3, p. 675—681.
 85. Campbell D. B., Jurgens R. F., Dyce R. B. et al. Radar interferometric observations of Venus at 70-centimeter wavelength. — Science, 1970, v. 170, N 3962, p. 1090—1092.
 86. Campbell D. B., Dyce R. B., Ingalls R. P. et al. Venus: topography revealed by radar data. — Science, 1972, v. 175, N 4021, p. 514—516.
 87. Campbell D. B., Burns B. A., Borickoff V. Venus: further evidence of impact cratering and tectonic activity from radar observations. — Science, 1979, v. 204, N 4400, p. 1424—1427.
 88. Campbell D. B., Burns B. A. Earth-based radar imagery of Venus. — J. Geophys. Res., 1980, v. 85, A 13, p. 8271—8281.
 89. Carpenter R. L., Goldstein R. M. Radar observations of Mercury. — Science, 1963, v. 142, N 3590, p. 381—382.
 90. Carpenter R. L. Study of Venus by CW radar. — Astron. J., 1964, v. 69, N 1 (1316), p. 2—11.
 91. Carpenter R. L. Study of Venus by CW radar — 1964 result. — Astron. J., 1966, v. 71, N 2, p. 142—152.
 92. Carpenter R. L. A radar determination of the Venus. — Astron. J., 1970, v. 75, N 1, p. 61—66.
 93. Croft T. Surface reflections of Pioneer Venus probe radio signals. — Geoph. Res. Lett., 1980, v. 7, N 7, p. 521—524.
 94. Dickel J. R. Measurements of the temperature of Venus at a wavelength of 3.75 cm for a full cycle of planetary phase angles. — Icarus, 1966, v. 5, N 3, p. 305—308.
 95. Dickel J. R. 6-cm observations and the microwave spectrum of Venus. — Icarus, 1967, v. 6, N 3, p. 417—426.
 96. Dickel J. R., Medd W. J. 4.5-cm observations of Venus. — Astron. J., 1968, v. 73, N 5, pt. 2, p. S91—S99.
 97. Dyce R. B., Pettengill G. H., Shapiro I. I. Radar determination of the rotations of Venus and Mercury. — Astron. J., 1967, v. 72, N 3, p. 351—353.
 98. Dyce R. B., Campbell D. B., Ingalls R. P. et al. Venus: topography revealed by radar data. — Bull. Amer. Astron. Soc., 1971, v. 3, N 4, pt. 1, p. 466.
 99. Epstein E. E., Oliver J. P., Soter S. L. et al. Venus: on an inverse variation with phase in the 3.4-mm emission during 1965 through 1967. — Astron. J., v. 73, N 4, p. 271—274.
 100. Evans J. V., Ingalls R. P. Radar observations of Venus at 23 and 3.8-cm wavelength. — Astron. J., 1966, v. 71, N 9, p. 854.
 101. Evans J. V., Brockleman R. A., Dupont E. N. et al. Radar observations of Venus at 23 cm in 1965/1966. — Astron. J., 1966, v. 71, N 9, p. 897—901.
 102. Evans J. V., Ingalls R. P., Rainville L. P. et al. Radar observations of Venus at 3.8-cm wavelength. — Astron. J., 1966, v. 71, N 9, p. 902—915.
 103. Goldstein R. M. Venus characteristics by earth-based radar. — Astron. J., 1964, v. 69, N 1, p. 12—18.
 104. Goldstein R. M. Radio and radar studies of Venus and Mercury. — Radio Science, 1970, v. 5, N 2, p. 391—395.
 105. Goldstein R. M., Rumsey H., Jr. A radar snapshot of Venus. — Science, 1970, v. 169, N 3949, p. 974—977.
 106. Goldstein R. M., Rumsey H. C. A radar image of Venus. — Icarus, 1972, v. 17, N 3, p. 699—703.
 107. Goldstein R. M., Green R. R., Rumsey H. C. Venus radar images. — J. Geoph. Res., 1976, v. 81, N 26, p. 4807—4817.
 108. Goldstein R. M., Green R. R., Rumsey H. C. Venus radar brightness and altitude images. — Icarus, 1978, v. 36, N 3, p. 334—352.
 109. Griffith P. H., Thornton D. D., Welch W. J. The microwave spectrum of Venus in the frequency range 18—36 Gc/sec. — Icarus, 1967, v. 6, N 2, p. 175—188.
 110. Hagfors T., Campbell D. B. Radar backscattering from Venus at oblique incidence at wavelength of 70 cm. — Astron. J., 1974, v. 79, N 4, p. 493—502.
 111. Hardebeck H. E. Radiometric observations of Venus and Mars at 430 Mc/s. — Astrophys. J., 1965, v. 142, N 4, p. 1696—1698.
 112. Hartmann W. K., Wood C. A. Origin and evolution of multiring basins. — Moon, 1971, v. 3, N 1, p. 3—78.
 113. Howard H. T., Tyler G. L., Fjeldbo G. et al. Venus: mass, gravity field, atmosphere and ionosphere as measured by the Mariner 10 dual-frequency radio system. — Science, 1974, v. 183, N 4131, p. 1291—1301.
 114. Hunten D. M., McGill G. E., Nagy A. F. 3. Current knowledge of Venus. — Space Sci. Rev., 1977, v. 20, N 3, p. 265—282.
 115. Ingalls R. P., Evans J. V. Scattering properties of Venus at 3.8 cm. — Astron. J., 1969, v. 74, N 2, p. 258—272.
 116. James J. C., Ingalls R. P., Rainville L. P. Radar echoes from Venus at 38 Mc/sec. — Astron. J., 1967, v. 72, N 8, p. 1047—1050.
 117. Jurgens R. F. Some preliminary results of the 70 cm studies of Venus. — Radio Sci., 1970, v. 5, N 2, p. 435—442.
 118. Jurgens R. F., Goldstein R. M., Rumsey H. R. et al. Images of Venus by three-station radar interferometry 1977 results. — J. Geophys. Res., 1980, v. 85, A 13, p. 8282—8294.
 119. Karp D., Morrow W. E., Jr. Smith W. B. Radar observations of Venus at 3.6 centimeters. — Icarus, 1964, v. 3, N 5—6, p. 473—475.
 120. Klemperer W. K., Ochs G. R., Boweles K. L. Radar echoes from Venus at 50 Mc/sec. — Astron. J., 1964, v. 69, N 1, p. 22—28.
 121. Kostenko V. I., Pavlov A. V., Sholomitsky G. B. et al. The brightness temperatures of planets at λ 1.4 mm. — Astrophys. J. Lett., 1971, v. 8, N 1, p. 41—42.
 122. Kroupenno N. N. Peculiarities of mm and cm radiowave propagation in the Venus atmosphere. — In: Planetary atmospheres. Symposium N. 40 IAU, D. Reidel Publ. Co., 1971, p. 32—25.
 123. Kroupenno N. N. Some characteristics of the Venus surface. — Icarus, 1972, v. 17, N 3, p. 692—698.
 124. Law S. E., Stallin D. H. Measurements of Venus and Jupiter near 1 cm wavelength. — Astrophys. J., 1968, v. 154, N 3, pt. 1, p. 1077—1086.
 125. Lynn V. L., Meeks M. L., Sohigian M. D. 8.5-millimeter radio emission from Venus and Tiros-A. — Astron. J., 1963, v. 68, N 5, p. 284.
 126. Malin M. C., Saunders R. S. Surface of Venus: evidence of diverse landforms from radar observations. — Science, 1977, v. 196, N 4293, p. 987—990.
 127. Masursky H., Eliason E., Ford P. G. et al. Pioneer Venus radar results: geology from images and altimetry. — J. Geophys. Res., 1980, v. 85, A 13, p. 8232—8260.
 128. McCullough T. P. Phase dependence of 2.7 cm wavelength radiation of

- Venus.— Icarus, 1972, v. 16, N 2, p. 310—313.
129. Melbourne W. G., Muhleman D. O., O'Handley D. A. Radar determination of the radius of Venus.— Science, 1968, v. 160, N 3831, p. 987—988.
 130. Muhleman D. O. Interferometric investigations of the atmosphere of Venus.— Radio Sci., 1970, v. 5, N 2, p. 355—362.
 131. Muhleman D. O., Berge G. L., Orton G. S. The brightness temperature of Venus and the absolute flux-density scale at 608 MHz.— Astrophys. J., 1973, v. 183, N 3, pt. 1, p. 1081—1085.
 132. Pettengill G. H., Briscoe H. W., Evans J. V. et al. A radar investigation of Venus.— Astron. J., 1962, v. 67, N 4, p. 181—190.
 133. Pettengill G. H., Dyce R. B., Campbell D. B. Radar measurements at 70 cm. Venus and Mercury.— Astron. J., 1967, v. 72, N 3, p. 330—337.
 134. Pettengill G. H., Eliason E., Ford P. G. et al. Pioneer Venus radar results: altimetry and surface properties.— J. Geophys. Res., 1980, v. 85, A 13, p. 8261—8270.
 135. Philips R. J., Sjogren W. L., Abbott E. A. et al. Gravity field of Venus: a preliminary analysis.— Science, 1979, v. 205, N 4401, p. 93—96.
 136. Ponsonby J. E., Tromson J. H., Imrie K. S. Radar observations of Venus and a determination of the astronomical unit. 1962.— Monthly Notices Roy. Astron. Soc., 1964, v. 128, N 1, p. 1—17.
 137. Rogers A. E. E., Ingalls R. P. Venus: mapping the surface reflectivity by radar interferometry.— Science, 1969, v. 165, N 3895, p. 797—799.
 138. Rogers A. E. E., Ingalls R. P. Radar mapping of Venus with interferometric resolution of the range-Doppler ambiguity.— Radio Sci., 1970, v. 5, N 2, p. 425—433.
 139. Rogers A. E. E., Ingalls R. P., Rainville L. P. The topography of a swath around the equator of the planet Venus from the wavelength dependence of the radar cross section.— Astron. J., 1972, v. 77, N 1, p. 100—103.
 140. Rogers A. E. E., Ingalls R. P., Pettengill G. H. Radar of Venus at 3.8 cm wavelength.— Icarus, 1974, v. 21, N 3, p. 237—241.
 141. Rumsey H. C., Morris G. A., Green R. R. et al. A radar brightness and altitude image of a portion of Venus.— Icarus, 1974, v. 23, N 1, p. 1—7.
 142. Russel C. T., Elphic R. C., Slavin J. A. Limits on the possible intrinsic magnetic field of Venus.— J. Geophys. Res., 1980, v. 85, A 13, p. 8319—8332.
 143. Sinclair A. C. E., Basart J. P., Buhl D. et al. Preliminary results of interferometric observations of Venus at 11.1 cm wavelength.— Radio Sci., 1970, v. 5, N 2, p. 347—354.
 144. Smith W. B., Ingalls R. P., Shapiro I. I. et al. Surface-height variations on Venus and Mercury.— Radio Science, 1970, v. 5, N 2, p. 411—423.
 145. Victor W. K., Stevens R. Explorations on Venus by radar.— Science, 1961, v. 134, N 3471, p. 46—49.
 146. Werner M. W., Neugebauer G., Houck J. R. et al. One-millimeter brightness temperatures of the planets.— Icarus, 1978, v. 35, N 3, p. 289—296.
 147. Whitcomb S. E., Hildebrand R. M., Keene J. et al. Submillimeter brightness temperatures of Venus, Jupiter, Uranus and Neptune.— Icarus, 1979, v. 38, N 1, p. 75—80.
 148. Zohar S., Goldstein R. M. Venus map: a detailed look at the feature β .— Nature, 1968, v. 219, N 5152, p. 357—358.

К главам 3—6

1. Авдеевский В. С., Маров М. Я., Рождественский М. К. Результаты измерений параметров атмосферы Венеры на советской АМС «Венера-4».— Косм. исслед., 1969, т. 7, № 2, с. 233—246.
2. Авдеевский В. С., Маров М. Я., Мошкин Б. Е., Экономов А. П. Результаты прямых измерений освещенности в атмосфере и на поверхности планеты Венера при полете АМС «Венера-8».— Доклады АН СССР, 1973, т. 210, № 4, с. 799—802.
3. Авдеевский В. С., Головин Ю. М., Завелевич С. С. и др. Предварительные результаты исследования светового режима в атмосфере и на поверхности Венеры.— Косм. исслед., 1976, т. 14, № 5, с. 735—742.

Список литературы

4. Авдеевский В. С., Маров М. Я. Исследование Венеры при помощи АМС серии «Венера».— В кн.: Аэромеханика и газовая динамика. М.: Наука, 1976, с. 205—236.
5. Авдеевский В. С., Семенченко В. В., Успенский Г. Р., Черемухина З. П. Стратосфера Венеры по данным акселерометрических измерений АМС «Венера-11» и «Венера-12».— Косм. исслед., 1982, т. 20, № 6, с. 913—920.
6. Авдеевский В. С., Селиванов А. С., Успенский Г. Р. и др. Предварительные результаты анализа рефракции света в пограничном слое атмосферы Венеры.— Косм. исслед., 1983, т. 21, № 3, с. 368—378.
7. Автоматические планетарные станции (Институт космических исследований).— М.: Наука, 1973, 279 с.
8. Азарх С. Л., Васильев М. Б., Виноградов В. А. и др. Предварительные результаты одновременного использования двух спутников «Венера-9» и «Венера-10» при двухчастотном радиопросвечивании ночной ионосферы Венеры.— Косм. исслед., 1978, т. 16, № 1, с. 120—126.
9. Аэростаты в атмосфере Венеры.— Киев: Наук. думка, 1985, 134 с.
10. Барсуков В. Л. Сравнительная планетология и ранняя история Земли.— Вестник АН СССР, 1982, № 4, с. 42—52.
11. Ветухновская Ю. Н., Кузьмин А. Д. Некоторые результаты совместной обработки измерений АМС «Венера-4» и наземных радиоастрономических и радиолокационных измерений.— В кн.: Физика Луны и планет. М., Наука, 1972, с. 359—365.
12. Волков В. П., Сидоров Ю. И., Ходаковский И. Л., Барсуков В. Л. О возможных конденсатах основного облачного слоя планеты Венера.— Геохимия, 1982, № 1, с. 3—22.
13. Волков В. П. Химия атмосферы и поверхности Венеры.— М.: Наука, 1983, 206 с.
14. Гельман Б. Г., Золотухин В. Г., Ламонов Н. И. и др. Анализ химического состава атмосферы Венеры на АМС «Венера-12» газовым хроматографом.— Письма в Астроном. журн., 1979, т. 5, № 5, с. 217—221.
15. Головин Ю. М., Мороз В. И., Мошкин Б. Е. и др. Атмосфера Венеры по данным оптических измерений на СА «Венера-11 и 12».— Косм. исслед., 1982, т. 20, № 4, с. 572—594.
16. Гнедых В. И., Жегулев В. С., Засова Л. В. и др. Предварительные результаты исследований инфракрасного спектра Венеры на орбитальных аппаратах «Венера-9» и «Венера-10».— Косм. исслед., 1976, т. 14, № 5, с. 758—767.
17. Голицын Г. С. Введение в динамику планетарных атмосфер.— Л.: Гидрометеиздат, 1973, 104 с.
18. Голицын Г. С. Оценки турбулентного режима атмосферы вблизи поверхности Венеры по данным АМС «Венера-9» и «Венера-10».— Косм. исслед., 1978, т. 16, № 1, с. 156—158.
19. Динамика атмосферы Венеры.— Л.: Наука, 1974, 184 с.
20. Засова Л. В., Шпенкух Д., Мороз В. И. и др. Инфракрасный эксперимент на АМС «Венера-15» и «Венера-16». Некоторые выводы о строении облаков, основанные на анализе спектров.— Косм. исслед., 1985, т. 23, № 2, с. 221—235.
21. Изаков М. Н. Структура и динамика верхних атмосфер Марса и Венеры.— Успехи физ. наук, 1976, т. 119, вып. 2, с. 295—342.
22. Истомин В. Г., Гречнев К. В., Кочнев В. А. Масс-спектрометрические измерения состава нижней атмосферы Венеры.— Письма в Астроном. журн., 1979, т. 5, № 5, с. 211—216.
23. Истомин В. Г., Гречнев К. В., Кочнев В. А. «Венера-13», «Венера-14»: масс-спектрометрия атмосферы.— Косм. исслед., 1983, т. 21, № 3, с. 410—420.
24. Келдыш М. В., Маров М. Я. Космические исследования.— М.: Наука, 1981, 192 с.

25. Кержанович В. В., Рождественский М. К., Андреев Б. Н. и др. Скорость ветра и некоторые характеристики поверхности Венеры, полученные с помощью АМС «Венера-7». — Косм. исслед., 1972, т. 10, № 3, с. 390—399.
26. Кержанович В. В., Анцибор Н. М., Кустодиев В. Д. и др. Вертикальные профили скорости ветра в атмосфере Венеры по доплеровским измерениям АМС «Венера-13» и «Венера-14». — Косм. исслед., 1983, т. 21, № 2, с. 211—217.
27. Кондратьев К. Я., Смоктий О. И. О возможной природе облаков в атмосфере Венеры. — В кн.: Проблемы физики атмосферы. Л.: Изд-во ЛГУ, 1970, вып. 8, с. 11—30.
28. Кондратьев К. Я., Бунакова А. М., Анолик А. М. Об особенностях теплового излучения атмосфер Марса и Венеры. — В кн.: Перенос излучения в атмосфере. Л.: Изд-во ЛГУ, 1972, с. 38—60.
29. Кондратьев К. Я., Бунакова А. М., Анолик М. В. Расчет поля уходящего теплового излучения верхней атмосферы Венеры. — В кн.: Проблемы физики атмосферы. Л.: Изд-во ЛГУ, 1974, вып. 11, с. 11—18.
30. Кондратьев К. Я. Метеорология Венеры: Итоги науки и техники. — Косм. исслед., 1975, т. 7, с. 8—98.
31. Кондратьев К. Я. Сравнительная метеорология планет. — Л.: Гидрометеиздат, 1975, 48 с.
32. Кондратьев К. Я., Москаленко Н. И. Тепловое излучение планет. — Л.: Гидрометеиздат, 1976, 263 с.
33. Кондратьев К. Я., Москаленко Н. И., Терзи В. Ф. Радиационное выхолаживание в атмосферах Марса, Венеры и Юпитера. — Доклады АН СССР, 1977, т. 236, № 6, с. 1334—1337.
34. Кондратьев К. Я. Метеорология планет. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1977, 294 с.
35. Кондратьев К. Я., Москаленко Н. И. Парниковый эффект в атмосферах планет. — Астроном. вестник, 1978, т. 8, № 3, с. 129—143.
36. Кондратьев К. Я., Москаленко Н. И., Терзи В. Ф. Оптическая модель облачного покрова Венеры. — Доклады АН СССР, 1979, т. 250, № 2, с. 312—315.
37. Кондратьев К. Я., Москаленко Н. И. Оптические свойства и микроструктура венерианских облаков по данным об уходящем тепловом излучении планеты Венера. — Доклады АН СССР, 1979, т. 248, № 3, с. 568—573.
38. Кондратьев К. Я., Москаленко Н. И. Парниковый эффект атмосфер планет. — Астроном. вестник, 1979, т. 13, № 3, с. 129—143.
39. Кондратьев К. Я., Москаленко Н. И., Терзи В. Ф. Лучистый теплообмен в атмосфере Венеры. — Доклады АН СССР, 1980, т. 251, № 6, с. 1345—1349.
40. Кондратьев К. Я., Москаленко Н. И. Эволюция атмосферы и парниковый эффект. — Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1980, т. 16, № 12, с. 1151—1162.
41. Кондратьев К. Я., Москаленко Н. И. Парниковый эффект атмосферы и климат. — В кн.: Итоги науки и техники. Метеорология и климатология, т. 12. М., ВИНТИ, 1984, 262 с.
42. Краснопольский В. А. Фотохимия атмосферы Венеры и Марса. — М.: Наука, 1982, 296 с.
43. Кремнев Р. С., Карягин В. П., Бальбердин В. В., Клевцов А. А. Аэростаты в атмосфере Венеры. — Киев: Наук. думка, 1985, 134 с.
44. Ксанфомалити Л. В., Селиванов А. С. Облака Венеры: относительные высоты контрастных ультрафиолетовых деталей. — Косм. исслед., 1978, т. 16, № 6, с. 959—962.
45. Ксанфомалити Л. В., Васильчиков Н. М., Ганпанцера О. Ф. и др. Электрические разряды в атмосфере Венеры. — Письма в Астроном. журн., 1979, т. 5, № 5, с. 229—236.
46. Ксанфомалити Л. В., Горшкова Н. В., Хондырев В. К. Скорость ветра у поверхности Венеры по акустическим измерениям. — Косм. исслед., 1983, т. 21, № 2, с. 218—224.
47. Ксанфомалити Л. В. Планета Венера. — М.: Наука, 1985, 376 с.
48. Кузьмин А. Д., Маров М. Я. Физика планеты Венера. — М.: Наука, 1974, 408 с.
49. Линкин В. М., Шефнер К., Мацыгорин И. А. и др. Инфракрасный эксперимент на АМС «Венера-15» и «Венера-16». 5. Предварительные результаты анализа полей яркостных температур и тепловых потоков. — Косм. исслед., 1985, т. 23, № 2, с. 248—258.
50. Маров М. Я., Авдеевский В. С., Рождественский М. К. и др. Предварительные результаты исследования атмосферы Венеры при помощи АМС «Венера-7». — Косм. исслед., 1971, т. 9, № 4, с. 570—579.
51. Маров М. Я., Бывшев Б. В., Мануйлов К. Н. и др. Нефелометрические измерения на станциях «Венера-9» и «Венера-10». — Косм. исслед., 1976, т. 14, № 5, с. 729—734.
52. Мороз В. И., Парфентьев Н. А., Санько Н. Ф. и др. Предварительные результаты узкополосного фотометрического зондирования облачного слоя Венеры в области спектра 0,80—0,87 мкм на спускаемых аппаратах «Венера-9» и «Венера-10». — Косм. исслед., 1976, т. 14, № 5, с. 743—757.
53. Мороз В. И., Мухин Л. М. О ранних этапах эволюции атмосферы и климата на планетах земной группы. — Косм. исслед., 1977, т. 15, № 6, с. 901—922.
54. Мороз В. И., Мошкин Б. Е., Экономов А. П. и др. Спектрофотометрический эксперимент на спускаемых аппаратах «Венера-11» и «Венера-12»: некоторые результаты анализа спектра дневного неба Венеры. — Письма в Астроном. журн., 1979, т. 5, № 5, с. 222—228.
55. Мороз В. И. Альbedo Венеры в диапазоне 0,2—4,0 мкм. — Косм. исслед., 1981, т. 19, № 4, с. 591—598.
56. Мороз В. И., Головин Ю. М., Мошкин Б. Е., Экономов А. П. Спектрофотометрический эксперимент на спускаемых аппаратах «Венера-11» и «Венера-12». 3. Результаты фотометрических измерений. — Косм. исслед., 1981, т. 19, № 4, с. 599—612.
57. Мороз В. И., Мошкин Б. Е., Экономов А. П. и др. Спектрофотометрический эксперимент на «Венере-13» и «Венере-14». — Письма в Астроном. журн., 1982, т. 8, № 7, с. 404—410.
58. Мороз В. И., Дёлер В., Устинов Е. А. и др. Инфракрасный эксперимент на АМС «Венера-15» и «Венера-16». 4. Предварительные результаты анализа спектров в области полос поглощения H_2O и SO_2 . — Косм. исслед., 1985, т. 23, № 2, с. 236—247.
59. Мухин Л. М., Гельман Б. Г., Ламонов Н. И. и др. Газохроматографический анализ химического состава атмосферы Венеры на спускаемых аппаратах АМС «Венера-13» и «Венера-14». — Косм. исслед., 1983, т. 21, № 2, с. 225—230.
60. Обухов А. М., Голицын Г. С. Оценки нижней границы и толщины облачного слоя на Венере. — Косм. исслед., 1968, т. 6, № 5, с. 759—764.
61. Очерки сравнительной планетологии. — М.: Наука, 1981, 326 с.
62. Первые результаты научных исследований на «Венере-11» и «Венере-12». — Письма в Астроном. журн., 1979, т. 5, № 1, с. 3—7.
63. Принн Р. Д. Вулканы и облака Венеры. — В мире науки, 1985, № 5, с. 4—17.
64. Сагдеев Р. З., Мороз В. И. «Венера-13» и «Венера-14». — Письма в Астроном. журн., 1982, т. 8, № 7, с. 387—390.
65. Селиванов А. С., Гектин Ю. М., Кержанович В. В. и др. Съемка облачного слоя Венеры с орбитального аппарата станции «Венера-9». — Косм. исслед., 1978, т. 16, № 6, с. 877—885.
66. Соболев В. В. Исследование атмосферы Венеры. Ч. 1. — Астроном. журн., 1964, т. 41, с. 97—103.
67. Соболев В. В. Исследование атмосферы Венеры. Ч. 2. — Астроном. журн., 1968, т. 45, № 1, с. 169—176.

68. Сурков Ю. А., Андрейчиков Б. М., Калинкина О. М. О содержании аммиака в атмосфере Венеры по данным автоматической станции «Венера-8». — Доклады АН СССР, 1973, т. 213, № 2, с. 296—298.
69. Сурков Ю. А., Иванова В. Ф., Пудов А. Н. и др. Измерение содержания пароводяной воды в атмосфере Венеры на АМС «Венера-13» и «Венера-14». — Письма в Астроном. журн., 1982, т. 8, № 7, с. 411—413.
70. Титов Д. В. О возможности образования аэрозоля в химической реакции между SO_2 и NH_3 в условиях атмосферы Венеры. — Косм. исслед., 1983, т. 21, № 3, с. 401—409.
71. Шаронов В. В. Планета Венера. — М.: Наука, 1965, 252 с.
72. Шпенкух Д., Засова Л. В., Шефнер К. и др. Инфракрасный эксперимент на АМС «Венера-15» и «Венера-16». 2. Предварительные результаты восстановления температурных профилей. — Косм. исслед., 1985, т. 23, № 2, с. 206—220.
73. Экономов А. П., Головин Ю. М., Мошкин Б. Е. Оптические свойства облаков и подоблачной атмосферы по данным фотометрических измерений на спускаемых аппаратах АМС «Венера-9» и «Венера-10». — Косм. исслед., 1978, т. 16, № 6, с. 901—918.
74. Эртель Д., Мороз В. И., Нопираковский И. и др. Инфракрасный эксперимент на АМС «Венера-15» и «Венера-16». 1. Методика и первые результаты. — Косм. исслед., 1985, т. 23, № 2, с. 191—205.
75. Barker E. S. Comparison of simultaneous CO_2 and H_2O observations of Venus. — J. Atmos. Sci., 1975, v. 32, N 6, p. 1071—1075.
76. Bauer S. J. Solar control of the Venus ionosphere. — Sitzungsber. österr. Akad. Wiss.-naturwiss. Kl., 1983, Abt. 2, 192, N 8—10, S. 309—317.
77. Bertaux J. L., Chassefiere E., Kurt V. G. Venus EUV measurements of hydrogen and helium from Venera 11 and Venera 12. — Adv. Space Res., 1985, v. 5, N 9, p. 119—124.
78. Birkeland P. W., Williams B. G., Konopliv A. S. A navigation model for the venusian atmosphere. — J. Astronaut. Sci., 1982, v. 30, N 4, p. 367—383.
79. Blamont J., Ragent B. Further results of the Pioneer Venus nephelometer experiment. — Science, 1979, v. 205, N 4401, p. 67—70.
80. Blamont J. The exploration of the atmosphere of Venus by balloons. — Adv. Space Res., 1985, v. 5, N 9, p. 99—106.
81. Boese R. W., Pollack J. B., Silvaggio P. M. First results from the large probe infrared radiometer experiment. — Science, 1979, v. 203, p. 797—800.
82. Bolle H.-J. Evolution of planetary atmospheres and the present state of their exploration. — Preprint. Univ. of Munich, 1975, 48 p.
83. Borucki W. J. et al. Laboratory simulation of venusian lightning. — Geophys. Res. Lett., 1983, v. 10, N 10, p. 961—964.
84. Brace L. H., Colin L. Pioneer Venus: evolving coverage of the near-Venus environment. — EOS Trans. Amer. Geophys. Union, 1984, v. 65, N 5, p. 401.
85. Chamberlain J. W. Theory of planetary atmospheres. An Introduction to their physics and chemistry. — Pergamon Press, New York e. a., 1978, 336 p.
86. Cimino J. B., Elachi C. Precipitation on Venus: properties and possibilities of detection. — J. Atmos. Sci., 1979, v. 36, N 7, p. 1168—1177.
87. Coffeen D. L. Polarization and scattering characteristics in the atmospheres of Earth, Venus, and Jupiter. — J. Opt. Soc. Amer., 1979, v. 69, N 8, p. 1051—1064.
88. Colin L., Hall Ch. F. The Pioneer Venus program. — Space Science Rev., 1977, v. 20, N 3, p. 283—306.
89. Colin L. Encounter with Venus: an update. — Science, 1979, v. 205, N 4401, p. 44—46.
90. Covey C., Schubert G. Planetary-scale waves in the Venus atmosphere. — J. Atmos. Sci., 1982, v. 39, N 11, p. 2397—2413.
91. Craig R. A. et al. Sulfur trioxide in the lower atmosphere of Venus? — Icarus, 1983, v. 53, N 1, p. 1—9.
92. Craft T. A., Price G. H. Evidence for a low-altitude origin of lightning on Venus. — Icarus, 1983, v. 53, N 3, p. 548—551.
93. Devaux C., Herman M., Lenoble J. Interpretation of the photometric measurements of Venus by Mariner 10. — J. Atmos. Sci., 1975, v. 32, N 6, p. 1177—1189.
94. Dickinson R. E. Dynamics and thermal structure of planetary atmospheres. — XVII IAF Congress, Anaheim, IAF-76-072, 1976, 7 p.
95. Diner D. J., Apt J., Elson L. S. Comparison of ground-based and spacecraft observations of the infrared emission from Venus: the nature of thermal contrasts. — Icarus, 1982, v. 52, N 2, p. 301—319.
96. Dollfus A. Venus: evolution of the upper atmospheric clouds. — J. Atmos. Sci., 1975, v. 32, N 6, p. 1060—1070.
97. Donahue T. M. et al. Venus was wet: a measurement of the ratio of deuterium to hydrogen. — Science, 1982, v. 216, N 4546, p. 630—632.
98. Ekonomov A. P. et al. Scattered UV solar radiation within the clouds of Venus. — Nature, 1984, v. 307, N 5949, p. 345—347.
99. Esposito L. W. Long term changes in Venus sulfur dioxide. — Adv. Space Res., 1985, v. 5, N 9, p. 85—90.
100. Florensky C. P., Volkov V. V., Nikolaeva O. V. A geochemical model of the Venus troposphere. — Icarus, 1978, v. 33, N 3, p. 537—553.
101. Gierasch P. J. Planetary atmospheres. — Revs. Geophys. and Space Phys., 1975, v. 13, N 3, p. 790—793.
102. Golitsyn G. S. Some problems of Venus' atmospheric dynamics. — Icarus, 1984, v. 60, N 2, p. 289—306.
103. Good J. C., Schloerb F. P. Limits on Venus' SO_2 abundance profile from interferometric observations at 3.4 mm wavelength. — Icarus, 1983, v. 53, N 3, p. 538—547.
104. Goody R. M. The structure of the Venus cloud veil. — J. Geophys. Res., 1965, v. 70, p. 5471—5481.
105. Goody R. M. Motions of planetary atmospheres. — Ann. Rev. Astron. Astrophys., 1969, v. 7, p. 303—352.
106. Goody R. M., Walker J. C. G. Atmospheres. — Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1972, 150 p.
107. Goody R. M. Weather on the inner planets. — New Sci., 1973, v. 58, p. 602—605.
108. Goody R. Climate and the planets. — Natur. Hist., 1978, v. 87, N 1, p. 94—93.
109. Gordiets B. F., Kulikov Yu. N. On the mechanisms of cooling of the nightside thermosphere of Venus. — Adv. Space Res., 1985, v. 5, N 9, p. 113—117.
110. Hapke B., Nelson R. Evidence for an elemental sulfur component of the clouds from Venus spectrophotometry. — J. Atmos. Sci., 1975, v. 32, N 6, p. 1212—1218.
111. Henderson-Sellers A. The origin and evolution of planetary atmospheres. — Bristol: Adam Hilger Ltd., 1983, XVI+236 p.
112. Hess S. L. Dust on Venus. — J. Atmos. Sci., 1975, v. 32, N 6, p. 1076—1078.
113. Hide R. Dynamics of rotating fluids and planetary atmospheres. — Recent Adv. in Meteorol. and Phys. Oceanogr., 1985, p. 37—46.
114. Hoffman J. H. et al. Composition and structure of the Venus atmosphere: results from Pioneer Venus. — Science, 1979, v. 205, N 4401, p. 49—52.
115. Hou A. Y., Goody R. M. Diagnostic requirements for the superrotation on Venus. — J. Atmos. Sci., 1985, v. 42, N 5, p. 413—432.
116. Hunt G. E., Godfrey D., Haines K., Moore V. The meteorology of Jupiter and Saturn. — Recent Adv. Planet. Meteorol.: Seymour Hess Mem. Symp. — IUGG Gen. Assem., Hamburg, 1983. Cambridge e. a., 1985, p. 101—120.
117. Hunt D. M., Colin L., Donahue T. M., Moroz V. I. (Eds.) Venus. — The Univ. of Arizona Press, 1983, 1143 p.

118. Kasting J. F., Pollack J. B. Loss of water from Venus: 1. Hydrodynamic escape of hydrogen.—*Icarus*, 1983, v. 53, N 3, p. 479—508.
119. Kasting J. F., Pollack J. B., Ackerman T. P. Response of earth's atmosphere to increases in solar flux and implications for loss of water from Venus.—*Icarus*, 1984, v. 57, N 3, p. 4335—4355.
120. Kawabata K., Hansen J. E. Interpretation of the variation of polarization over the disk of Venus.—*J. Atmos. Sci.*, 1975, v. 32, N 6, p. 1133—1139.
121. Kliore A. J. Recent results of the Venus atmosphere from Pioneer Venus radio occultations.—*Adv. Space Res.*, 1985, v. 5, N 9, p. 41—49.
122. Knollenberg R. G., Hunt D. M. Clouds of Venus: particle size distribution measurements.—*Science*, 1979, v. 203, p. 792—795.
123. Knollenberg R. G. et al. The clouds of Venus.—*Space Sci. Revs.*, 1977, v. 20, N 3, p. 329—354.
124. Knollenberg R. G., Hunt D. M. Clouds of Venus: a preliminary assessment of microstructure.—*Science*, 1979, v. 205, N 4401, p. 70—74.
125. Knollenberg R. G. A reexamination of the evidence for large, solid particles in the clouds of Venus.—*Icarus*, 1984, v. 57, N 2, p. 161—183.
126. Kondratyev K. Ya. Radiation processes in the atmosphere. WMO Monograph N 309, Geneva, 1972, 214 p.
127. Kondratyev K. Ya., Moskalenko N. I. Greenhouse effect of planetary atmospheres.—*Nuovo Cimento C*, 1980, v. 3, N 6.
128. Kondratyev K. Ya., Moskalenko N. I. The correlation of the planetary atmosphere structural characteristics with their optical properties and radiative heat exchange peculiarities.—*Adv. Space Res.*, 1981, v. 1, N 8, p. 59—64.
129. Kondratyev K. Ya., Moskalenko N. I. Comparative analysis of chemical composition and optical properties of gaseous and disperse phases of the earth-group planetary atmospheres.—*Adv. Space Res.*, 1981, v. 1, N 8, p. 53—58.
130. Kondratyev K. Ya., Moskalenko N. I. Optical properties of the venusian atmosphere and radiative heat exchange.—*II Nuovo Cimento*, 1981, v. 4C, N 6, p. 698—735.
131. Kondratyev K. Ya., Hunt G. E. Weather and climate on planets.—Oxford e. a., Pergamon Press, 1982, 955 p.
132. Kondratyev K. Ya., Moskalenko N. I., Parzhin S. N., Skvortsova C. Volcanic activity and climates of the Earth and Mars.—*Geofis. Int.*, 1985, v. 24, N 2, p. 217—243.
133. Kondratyev K. Ya., Moskalenko N. I. The atmospheric greenhouse effect and climate on various planets.—*Adv. Space Res.*, 1985, v. 5, N 8, p. 37—40.
134. Krasnopolsky V. A. Lightnings and nitric oxide on Venus.—*Planet. and Space Sci.*, 1983, v. 31, N 11, p. 1363—1369.
135. Krasnopolsky V. A. Chemical composition of Venus clouds.—*Planet. and Space Sci.*, 1985, v. 33, N 1, p. 109—117.
136. Krasnopolsky V. A. Total injection of water vapor into the Venus atmosphere.—*Icarus*, 1985, v. 62, N 2, p. 221—229.
137. Krass M. S. Ice on planets of the solar system.—*J. Glaciol.*, 1984, v. 30, N 106, p. 259—274.
138. Ksanfomaliti L. V. Volcanism on Venus: connecting link? —*Adv. Space Res.*, 1985, v. 5, N 9, p. 91—98.
139. Kumar S., Hunt D. M., Pollack J. B. Nonthermal escape of hydrogen and deuterium from Venus and implications for loss of water.—*Icarus*, 1983, v. 55, N 3, p. 1, p. 369—389.
140. Lacy A. A. Cloud structure and heating rates in the atmosphere of Venus.—*J. Atmos. Sci.*, 1975, v. 32, N 6, p. 1107—1124.
141. Lane W. A., Opstbaum R. High altitude Venus haze from Pioneer Venus limb scans.—*Icarus*, 1983, v. 54, N 1, p. 48—58.
142. Levin Z., Borucki W. J., Toon O. B. Lightning generation in planetary atmospheres.—*Icarus*, 1983, v. 56, N 1, p. 80—115.
143. Levine J. S. (Ed.) The photochemistry of atmospheres: Earth, the other planets, and comets.—*Academic Press*, 1985.
144. Lewis J. S., Prinn R. G. Planets and their atmospheres.—*Academic Press*, New York, 1983, 460 p.
145. Limaye S. S. Venus atmospheric circulations: observations and implications of the thermal structure.—*Adv. Space Res.*, 1985, v. 5, N 9, p. 51—62.
146. Martonchik J. V., Beer R. Analysis of spectrophotometric observations of Venus in the 3—4 micron region.—*J. Atmos. Sci.*, 1975, v. 32, N 6, p. 1151—1156.
147. Mason B. J. The atmospheres of the planets.—*The Meteorol. Mag.*, 1978, v. 107, N 1268, p. 69—88.
148. Mayr H. G. et al. On the diurnal variations in the temperature and composition: a three-dimensional model with superrotation.—*Adv. Space Res.*, 1985, v. 5, N 9, p. 109—112.
149. Newell R. E. Is Venus younger than Earth? —*Speculations in Sci. and Technol.*, 1984, v. 7, N 1, p. 51—57.
150. Oertel D. et al. Infrared spectrometry of Venus from "Venera-15" and "Venera-16".—*Adv. Space Res.*, 1985, v. 5, N 9, p. 25—36.
151. Paige D. A., Ingersoll A. P. Annual heat balance of martian polar caps: Viking observations.—*Science*, 1985, v. 228, N 4704, p. 1160—1168.
152. Parisot J.-P., Moreels G. Aeronomie de la haute atmosphere de Venus.—*Adv. Space Res.*, 1983, v. 2, N 10, p. 7—11.
153. Parisot J.-P., Zucconi J.-M. Temperature effect on the photodissociation rates in the atmospheres of Mars and Venus.—*Icarus*, 1984, v. 60, N 2, p. 327—331.
154. Paxton L. J., Anderson D. E., Jr., Stewart A. I. F. The Pioneer of hydrogen Lyman alpha data.—*Adv. Space Res.*, 1985, v. 5, N 9, p. 129—132.
155. Pollack J. B. et al. A determination of the composition of the Venus clouds from aircraft observations in the infrared.—*J. Atmos. Sci.*, 1975, v. 32, N 6, p. 1140—1150.
156. Pollack J. B. et al. Nature of the ultraviolet absorber in the Venus clouds: inferences based on Pioneer Venus data.—*Science*, 1979, v. 205, N 4401, p. 76—79.
157. Pollack J. B., Black D. C. Implications of the gas compositional measurements of Pioneer Venus for the origin of planetary atmospheres.—*Science*, 1979, v. 205, N 4401, p. 56—59.
158. Pollack J. B. Climatic change on the terrestrial planets.—*Icarus*, 1979, v. 37, N 3, p. 479—553.
159. Pollack J. B., Kasting J., Richardson S. History of water on Venus.—*Bull. Amer. Astron. Soc.*, 1983, v. 15, N 3, p. 819.
160. Prinn R. G. Photochemistry of HCl and other minor constituents in the atmosphere of Venus.—*J. Atmos. Sci.*, 1971, v. 28, N 6, p. 1058—1063.
161. Prinn R. G. Venus: composition and structure of the visible clouds.—*Science*, 1973, v. 182, N 4117, p. 1132—1175.
162. Prinn R. G. The upper atmosphere of Venus: a review.—*Phys. and Chem. Upper Atm.*, Dordrecht-Boston, 1973, p. 335—344.
163. Prinn R. G. Venus: chemical and dynamical processes in the stratosphere and mesosphere.—*J. Atmos. Sci.*, 1975, v. 32, N 6, p. 1237—1247.
164. Prinn R. G. On the possible roles of gaseous sulfur and sulfates in the atmosphere of Venus.—*Geophys. Res. Lett.*, 1979, v. 6, N 10, p. 807—810.
165. Prinn R. G. The sulphur cycle and clouds of Venus.—*Recent Adv. Planet. Meteorol.*, Seymour Hess Mem. Symp.-IUGG Gen. Assem., Hamburg, 18—19 Aug. 1983. Cambridge e. a., 1985, p. 1—15.
166. Read P. L. Super-rotation and diffusion of axial angular momentum. I. "Speed limits" for axisymmetric flow in a rotating cylindrical fluid annulus.—*Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 1986, v. 112, N 471, p. 231—252.
167. Read P. L. Super-rotation and diffusion of axial angular momentum. II. A review of quasi-axisymmetric models of planetary atmospheres.—*Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 1986, v. 112, N 471, p. 253—272.

168. Revercomb H. E., Sromovsky L. A., Suomi V. E., Boese R. W. Thermal net flux measurements on the Pioneer Venus entry probes.—*Adv. Space Res.*, 1985, v. 5, N 9, p. 81—84.
169. Richardson S. M., Pollack J. B., Reynolds R. T. Water loss on Venus: the role of carbon monoxide.—*Icarus*, 1984, v. 60, N 2, p. 307—316.
170. Ringwood A. E., Anderson D. L. Earth and Venus: a comparative study.—*Icarus*, 1977, v. 30, N 2, p. 243—253.
171. Rinnert K. Lightning on other planets.—*J. Geophys. Res.*, 1985, D90, N 4, p. 6225—6238.
172. Rossow W. B. Cloud microphysics: analysis of the clouds of Earth, Venus, Mars, and Jupiter.—*Icarus*, 1978, v. 36, N 1, p. 1—50.
173. Rossow W. B., Williams G. P. Large-scale motion in the Venus stratosphere.—*J. Atmos. Sci.*, 1979, v. 36, N 3, p. 377—389.
174. Rossow W. B. A general circulation model of a Venus-like atmosphere.—*J. Atmos. Sci.*, 1983, v. 40, N 2, p. 273—302.
175. Russel C. T., Brace L. H. Evidence for lightning on Venus.—*Nature*, 1979, v. 289, N 5714, p. 614—616.
176. Scarf F. L., Russell C. T. Lightning measurements from the Pioneer Venus orbiter.—*Geophys. Res. Lett.*, 1983, v. 10, N 12, p. 1192—1195.
177. Schaber G. G. Venus: limited extension and volcanism along zones of lithospheric weakness.—*Geophys. Res. Lett.*, 1982, v. 9, N 5, p. 449—502.
178. Schofield J. T., Taylor F. W. Net global thermal emission from venusian atmosphere.—*Icarus*, 1982, v. 52, N 2, p. 245—262.
179. Schofield J. T., Taylor F. W. Measurements of a mean, solar-fixed temperature and cloud structure of the middle atmosphere of Venus.—*Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 1983, v. 109, N 459, p. 57—80.
180. Schubert G. et al. Dynamics, winds, circulation and turbulence in the atmosphere of Venus.—*Space Sci. Revs.*, 1977, v. 20, N 4, p. 357—388.
181. Schubert G., Walterscheid R. Propagation of small-scale acoustic-gravity waves in the Venus atmosphere.—*J. Atmos. Sci.*, 1984, v. 41, N 7, p. 1202—1213.
182. Seiff A. et al. Thermal contrast in the atmosphere of Venus: initial appraisal from Pioneer Venus probe data.—*Science*, 1979, v. 205, N 4401, p. 46—48.
183. Sill G. T. The composition of the ultraviolet dark markings on Venus.—*J. Atmos. Sci.*, 1975, v. 32, N 6, p. 1201—1204.
184. Sill G. T. An hypothesis for the evolution of the Venus atmosphere.—*Amer. Astron. Soc. Div. for Planetary Sciences. 7th Annual Meet. Abstracts of Papers*, 1976, Austin, p. 35.
185. Sill G. T. The clouds of Venus: sulfuric acid by the lead chamber process.—*Icarus*, 1983, v. 53, N 1, p. 10—17.
186. Spänkuch D. et al. Venus spectra obtained from Venera spacecraft 15 and 16.—*IRS'84: Current problems in atmospheric radiation. Proc. of the Int. Radiation Symp.*, Perugia, 1984. A. Deepak Publ. Co., Hampton, 1984, p. 373—376.
187. Spänkuch D. Neue Ergebnisse über Venus und Mars auf der XXV. COSPAR.—*Generalsammlung*.—*Die Sterne*, 1985, v. 61, N 3, p. 161—164.
188. Stone P. H. The dynamics of the atmosphere of Venus.—*J. Atmos. Sci.*, 1975, v. 32, N 6, p. 1005—1016.
189. Suomi V. E., Limaye S. S. Venus: further evidence of vortex circulation.—*Science*, 1978, v. 201, N 4360, p. 1009—1011.
190. Suomi V. E., Sromovsky L. A., Revercomb H. E. Preliminary results of the Pioneer Venus small probe net flux radiometer experiment.—*Science*, 1979, v. 205, N 4401, p. 82—85.
191. Taylor F. W. Interpretation of Mariner 10 infrared observations of Venus.—*J. Atmos. Sci.*, 1975, v. 32, N 6, p. 1101—1106.
192. Taylor F. W. The vertical cloud structure on Venus inferred from Mariner 10 infrared measurements.—*AAS Div. for Planetary Sci. 6th Annual Meeting. Abstracts of Papers*, Columbia, 1976, p. 9.
193. Taylor F. W., McCleese D. J., Diner D. J. Polar clearing in the Venus clouds observed from the Pioneer orbiter.—*Nature*, 1979, v. 279, N 5714, p. 613—614.
194. Taylor F. W. et al. Infrared remote sounding of the middle atmosphere of Venus from the Pioneer orbiter.—*Science*, 1979, v. 203, p. 779—781.
195. Taylor F. W., Scarf F. L., Russel C. T., Brace L. H. Evidence for lightning on Venus.—*Nature*, 1979, v. 279, N 5714, p. 614—616.
196. Taylor F. W. et al. Temperature, cloud structure, and dynamics of Venus middle atmosphere by infrared remote sensing from Pioneer orbiter.—*Science*, 1979, v. 205, N 4401, p. 65—67.
197. Taylor F. W. et al. Infrared remote sensing of the atmosphere of Venus from the Pioneer-12 orbiter.—*Space Res. V. 20. Proc. Open Meet. Working Groups. Phys. Sci. 22nd Plenary Meet. COSPAR Bangalore*, 1979. Oxford e. a., 1980, p. 227—230.
198. Taylor F. W., Elson L. S., McCleese D. J., Diner D. J. Comparative aspects of Venus and terrestrial meteorology.—*Weather*, 1981, v. 36, N 2, p. 34—40.
199. Taylor F. W. Comparisons between the atmospheres of the terrestrial planets.—*Planet. Mars. Proc. Workshop Univ. Leeds*, 1982. Paris, 1982, p. 47—52.
200. Taylor F. W., Schofield J. T., Bradley S. P. Pioneer Venus atmospheric observations.—*Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 1982, A303, N 1477, p. 215—222. Discuss., p. 222—223.
201. Taylor H. A. et al. In situ results on the variation of neutral atmospheric hydrogen at Venus.—*Adv. Space Res.*, 1985, v. 5, N 9, p. 125—128.
202. Taylor F. W., Schofield J. T., Valdes P. J. Temperature structure and dynamics of the middle atmosphere of Venus.—*Adv. Space Res.*, 1985, v. 5, N 9, p. 5—23.
203. Taylor H. A., Jr., Grebowsky J. M. Venus nightside ionospheric troughs: implications for evidence of lightning and volcanism.—*J. Geophys. Res.*, 1985, A90, N 8, p. 7415—7426.
204. Taylor F. W., Calcutt S. B. Near-infrared spectroscopy of the atmosphere of Jupiter.—*J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer*, 1984, v. 32, N 5—6, p. 463—467.
205. Tomasko M. G. et al. The thermal balance of the atmosphere of Venus.—*Space Sci. Revs.*, 1977, v. 20, N 4, p. 389—412.
206. Tomasko M. G. et al. Preliminary results of the solar flux radiometer experiment aboard the Pioneer Venus multiprobe mission.—*Science*, 1979, 203, 795—797.
207. Tomasko M. G., Doose L. R., Smith P. H. Absorption of sunlight in the atmosphere of Venus.—*Science*, 1979, v. 205, N 4401, p. 80—82.
208. Tomasko M. G., Doose L. R., Smith P. H. The absorption of solar energy and the heating rate in the atmosphere of Venus.—*Adv. Space Res.*, 1985, v. 5, N 9, p. 71—79.
209. Trauger J. T., Lunine J. I. Spectroscopy of molecular oxygen in the atmospheres of Venus and Mars.—*Icarus*, 1983, v. 55, N 2, p. 272—281.
210. Travis L. D. On the origin of ultraviolet contrasts on Venus.—*J. Atmos. Sci.*, 1975, v. 32, N 6, p. 1190—1200.
211. Travis L. D. et al. Cloud images from the Pioneer Venus orbiter.—*Science*, 1979, v. 205, N 4401, p. 74—76.
212. Turekian K. K., Clark S. P., Jr. The non-homogeneous accumulation model for terrestrial planet formation and the consequences for the atmosphere of Venus.—*J. Atmos. Sci.*, 1975, v. 32, N 6, p. 1257—1261.
213. Walbach D., Hapke B. Light scattering in a spherical, exponential atmosphere, with applications to Venus.—*Icarus*, 1985, v. 63, N 3, p. 351—373.
214. Walterscheid R. L., Schubert G., Newman M., Kliore A. J. Zonal winds and the angular momentum balance of Venus' atmosphere within and above the clouds.—*J. Atmos. Sci.*, 1985, v. 42, N 19, p. 1982—1990.

215. Watson A. J. et al. Oxides of nitrogen and the clouds of Venus.— *Geophys. Res. Lett.*, 1979, v. 6, N 9, p. 743—746.
216. Whipple E. C., Northrop T. G., Mendis D. A. The electrostatics of dust plasma.— *J. Geophys. Res.*, 1985, A90, N 8, p. 7405—7413.
217. Whitten R. C. et al. Dynamics of the Venus ionosphere: a two-dimensional model study.— *Icarus*, 1984, v. 60, N 2, p. 317—326.
218. Williams G. P., Holloway J. L., Jr. The range and unity of planetary circulations.— *Nature*, 1982, v. 297, N 5864, p. 295—299.
219. Williams M. A., Thomason L. W. Optical signature of Venus Lightning as seen from space.— *Icarus*, 1983, v. 55, N 1, p. 185—186.
220. Young R. E., Pollack J. B. A three-dimensional model of dynamical processes in the Venus atmosphere.— *J. Atmos. Sci.*, 1977, v. 34, N 9, p. 1315—1351.
221. Young A. T. Chemistry and thermodynamics of sulfur on Venus.— *Geophys. Res. Lett.*, 1979, v. 6, N 1, p. 49—50.
222. Young A. T. Composite particles in the clouds of Venus.— *Bull. Amer. Astron. Soc.*, 1983, v. 15, N 3, p. 819.
223. Young R. E., Houben H., Pfister L. Baroclinic instability in the Venus atmosphere.— *J. Atmos. Sci.*, 1984, v. 41, N 15, p. 2310—2333.

Предметный указатель

А

Автоматические межпланетные станции (АМС)

- «Вега-1, -2» 5, 24, 27, 61, 62, 81, 217
- «Венера-1, -2, -3» 8, 10
- «Венера-4» 10, 11, 25, 72, 215
- «Венера-5, -6» 12, 25, 215
- «Венера-7» 12, 25, 215
- «Венера-8» 13, 25, 33, 61, 65, 124, 125
- «Венера-9, 10» 6, 14—16, 19, 25, 27, 35, 37, 40, 62, 124, 217
- «Венера-11, 12» 17—19, 25, 73, 80, 113, 165, 184
- «Венера-13, 14» 4, 5, 18—22, 26, 27, 37, 63, 92, 221
- «Венера-15, 16» 5, 22, 23, 26, 32, 53, 60, 67, 79
- «Маринер-2» 8, 12, 25
- «Маринер-5» 11, 25, 70
- «Маринер-10» 13, 14, 25, 70, 113, 133, 162, 173, 187
- «Пионер—Венера-1, -2» 17, 18, 25, 29, 32, 37, 48, 70, 73, 75, 81, 84, 100, 169, 187

Адвекция 223, 228

Азот 75

Аккреция 75, 230, 240

Альбедо

- однократного рассеяния 84, 140, 161
- поверхности 63
- сферическое 115

Анализ

- геолого-морфологический 56, 60
- рентгенофлуоресцентный 19, 24, 61, 62

Аргон 75, 89

Атмосфера 71, 228

- ветер 229
- вращение 98
- динамика 214, 229
- прозрачность 223
- пропускание 177
- сверхвращение 219, 222
- структура вертикальная 71
- температура 248
- химический состав 184, 248
- циркуляция 228

Аэрозоль 76, 80, 111, 120, 212

Б

Базальт 55, 58, 59

Баланс

- радиационный 206, 212
- тепловой 73, 106
- циклострофический 216

Бассейн 50

Бром 117

Верхняя граница облаков
ветер 104
высота 73
давление 120
температура 103
химический состав 111

Ветер
зональный 220
компоненты 216
меридиональный 216
природа 220, 225

Вода 87, 184
Водород 76, 86, 184
Водяной пар 166, 208
Возвышенности 39, 52, 53
Волны планетарные 106, 220
Впадины 37, 53
Вулканы 51, 55
Выхолаживание радиационное 107, 205

Г

Гелий 75
Градиент
давления 216
плотности 97
скорости ветра 217
температуры 85, 103
Грозы 80, 175
Грунт 19, 39, 61, 63—66, 168, 188, 231

Д

Давление
распределение 73
у верхней границы облаков 120
у нижней границы облаков 120
у поверхности 72, 101
эффективное
Двуокись азота 178, 208
Дегазация 232, 233
Диссипация 248
Диэлектрическая проницаемость 63, 65, 67
Долнина 52, 53

Ж

Желоб 46

И

Извержения вулканические 90, 181
Измерения
наземные 94, 186
оптические 94
поляризметрические 143, 187
радиоастрономические 60
радиоинтерферометрические 37, 66
радиолокационные 31, 40, 60, 82

радиометрические 104
радиорефракционные 81
спектроскопические 75, 79
фотометрические 73
Индикатриса рассеяния 121, 199
отражения 63
Ионосфера 71

К

Карбонилсульфид 87
Кальдера 50
Карта геологическая 82
гипсометрическая 34, 52, 53, 55
гравитационная 69, 70
радиолокационная 33, 41, 42, 44—46, 48, 82
радиотепловая 23, 67
тепловая 105
топографическая 49
Климат 241
Коагуляция капель 109
Компоненты малые (химические) 76
Конвекция 245
Конденсация 109
Концентрация
азота 75
водорода 76, 86
водяного пара 73, 78, 87
капель 128
кислорода 92, 95
малых компонентов 92
окиси углерода 92
сернистого газа 90
серной кислоты 193
соляной кислоты 213
углекислого газа 92, 209
хлора 79
электронов 73
Кора 37, 69
Кратер 43, 44, 46, 48, 51, 56, 58, 59
Криптон 75, 92
Коэффициент
поглощения 153
преломления 124
рассеяния 125
экстинкции 204

Л

Лава 50
Лед 247
Литосфера 37

М

Мантия 69
Мезопауза 71
Мезосфера 71

Модель облаков 200, 210
двухслойная 120
сернокислотных 116
трехслойная 128
четырёхслойная 188
Молнии 176
Момент количества движения 222
Морфология 52

Н

Нагревание радиационное 205
Неоднородность атмосферы
вертикальная 71
горизонтальная 105
«ультрафиолетовая» 228
V-образная 113
Y-образная 114, 173, 186
Ψ-образная 114
Неон 75, 92
Нижняя граница облаков
ветер 216
высота 73
давление 74
температура 172, 200

О

Облака
видимые 108
водность 108, 151
глобальная структура 170
движение 113
двухслойные 121, 133
микроструктура 84, 190
многослойные 126, 128
монодисперсные 136
однослойные 120
оптическая плотность 77, 110
отражательная способность 118, 131, 137
природа 109
свойства 118, 131
сернокислотные 86, 109
слоистые 200
состав 111, 196
структура 83, 128, 188
Оксид углерода 76
Освещенность 73, 163
Отражательная способность
планеты 117
поверхности 161

П

Парниковый эффект 196, 202
Перемешивание турбулентное 142
Плато 37, 52, 53
Плотность атмосферы 97
Поглощение
аэрозольное 174, 195
индуцированное давлением 208

Предметный указатель

молекулярное 174, 207
полное 187, 197
Показатель преломления 147, 188
Поле
скорости ветра 86, 104
температуры 99, 103, 172
яркости 108
Поляризация 143, 187
Полярный «воротничок» 104, 186
Профиль вертикальный
баланса радиационного 197
ветра 215, 221
давления 73
концентрации водяного пара 78
оптической плотности облаков 78
освещенности 78
поглощения радиации 197
скорости ветра 74
температуры 73
Пыль 39, 213

Р

Равнина 35, 58
Равновесие
конвективное 202
лучистое 202
Радиация
отраженная 197
поглощенная 162, 197, 201
рассеянная 76
солнечная 114
ультрафиолетовая 201
уходящая длинноволновая 80, 152, 164
Радиолокатор 31, 32, 36, 41
Радиолокация бистатическая 34, 35, 40, 65
Рассеяние
анизотропное 140
аэрозольное 77
консервативное 73
однократное 140, 161
рэлеевское 78, 186, 198
Режим тепловой 99, 105
Релаксация 186, 223
Рельеф Венеры 30, 33, 40, 49, 53, 56, 58
Ртуть 80

С

Сверхрефракция 102
Сера газообразная 79
Серная кислота 79, 115, 193
Сернистый газ 113
Сила Кориолиса 186, 224
Слой
аэрозольный 120
верхний атмосферы 71
дымки 187

надоблачный 121
нижней атмосферы 212
облачности 73
подоблачный 210
Сторона
дневная 91, 99
ночная 92, 99, 183
Стратосфера 153

Т

Тектоника 50, 52, 53, 58—60
Температура
контраст 93
мезосферы 71
поверхности 81
радиояркость 66, 67, 111
стратосферы 85
термосферы 90, 96, 106
тропосферы 86, 91
у поверхности 72, 101
экзосферы 96
яркость 104, 170
Теория переноса излучения 118, 123
Точка подземная 216
Трещина 39
Тропопауза 71
Тропосфера 168
Турбопауза 95
Турбулентность вертикальная 73, 217

У

Углекислый газ 92
Углерод 232
Угол наклона 34, 37, 39, 46, 53

Ф

Фотохимические процессы 167

Х

Химический состав
атмосферы 75, 86
грунта 198
облаков 86, 109, 111, 196
поверхности 168, 231
термосферы 90
Хлор 80, 219
Холм 53, 58

Ц

Циркуляция атмосферы
Гадлея 171, 172, 215, 220, 246
глобальная 103, 222
зональная 107, 220
крупномасштабная 222
меридиональная 107, 217, 222
обратная 217, 222

Предметный указатель

общая 220, 227
теория 225
трехмерная 223
циклоническая 245
четырёхсуточная 228, 245
численное моделирование 225, 245

Э

Эволюция
атмосферы 87, 89, 183, 233, 238
водяного пара 232, 238
коры 89
парникового эффекта 236
планеты 230
поверхности 231
состава атмосферы 88, 184
Электропроводность грунта 63
Эрозия 53, 60

Я

Яркость облаков 84, 214

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Научная аппаратура автоматических межпланетных станций . .	8
Глава 2. Поверхность и внутреннее строение Венеры	29
2.1. Общепланетарные характеристики	—
2.2. Рельеф	30
2.3. Физико-химические и физико-механические характеристики грунта	61
2.4. Внутреннее строение	67
Глава 3. Состав и структурные параметры атмосферы Венеры	71
Глава 4. Облака и радиационный режим в атмосфере Венеры	108
4.1. Общие особенности облачного покрова	—
4.2. Вертикальная структура облачного покрова	119
4.3. Химический состав, микроструктура и оптические свойства облаков	130
4.4. Прямые измерения с АМС «Венера»	157
4.5. Данные АМС «Венера» и «Пионер—Венера»	165
Глава 5. Динамика атмосферы Венеры	214
Глава 6. Эволюция Венеры	230
6.1. Происхождение планеты	—
6.2. Изменения климата	241
6.3. Диссипация атмосферы	248
Список литературы	254
Предметный указатель	271

Монография

Кирилл Яковлевич Кондратьев
Николай Николаевич Крушенио
Арнольд Сергеевич Селиванов

Планета Венера

Редактор Л. И. Верес. Художник В. В. Быков. Технический редактор М. И. Брайнина.
Корректор Т. В. Алексеева.

ИБ № 1758. Сдано в набор 15.09.86. Подписано в печать 15.12.86. М-15339. Формат 60×90^{1/16}.
Бумага типографская № 1. Литературная гарнитура. Печать высокая. Печ. л. 17,5. Кр.-отт.
17,5. Уч.-изд. л. 19,84. Тираж 1750 экз. Индекс МОЛ-166. Заказ № 579. Цена 3 р. 40 к.
Гидрометеониздат. 199226. Ленинград, Беринга, 38.

Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского
объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при
Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
190000, Ленинград, Прачечный переулок, 6.